



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

RENGASAIHION JA MUOTTIMUODON TUTKIMINEN

Ville Kinnunen

Opinnäytetyö
Lokakuu 2016
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Auto- ja työkonetekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Auto- ja työkonetekniikka

KINNUNEN, VILLE:
Rengasaihion ja muottimuodon tutkiminen

Opinnäytetyö 55 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Lokakuu 2016

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kokoluokan 225/40 R18 rengasaihion käyttäytymistä muotissa: miten aihion muotoon päädyttiin, ja miten se soveltuu muottiin. Työssä käytettiin Abaqus-elementtimenetelmäohjelmaa. Ensin selvitettiin teoriaa renkaasta, sen valmistusprosessista, rengasmuoteista, kumeista ja elementtimenetelmästä. Sitten tehtiin pyörähdysymmetrinen 2D-FEM-malli komponenttien rakennekuvien avulla. Materiaaliominaisuudet saatiin laboratoriosta ja analyysissä käytettävät paineet paistoreseptistä. FEM-mallin luotettavuutta testattiin kolmella eri verifiointilla. Lopuksi mallinnettiin kuusi eri rengasaihiota, joiden käyttäytymistä verrattiin tutkittavaan rengasaihioon. Työ tehtiin Nokian Renkaat Oyj:lle.

Tulosten perusteella 2D-FEM-malli toimi luotettavasti. Eri rengasaihioiden vertailussa kokoluokan 225/40 R18 sivupinnan painejakauma poikkesi muista ja rengasaihion sivupinta pääsi irtoamaan muotista analyysien vaiheiden aikana. Paistoprosessin alku- ja loppuvaiheen välillä vahvikekuitujen ja teräsvöiden kutistumat suurenivat renkaan pinnan ja profiilin kasvaessa sekä pienenivät runkokoordinaattia kiristettäessä. Sivupinnan ohuin kohta muodostui pääosin muotin pinnan ja sivupinnan liitoskohdan läheisyyteen.

Työssä oli laskennallisia ja kokeellisia virheitä. Laskennallisia virheitä syntyi lähinnä geometrian ja FEM-mallin yksinkertaistuksesta ja mittausvälineistä. Näistä aiheutuneet virheet olivat kuitenkin pieniä eivätkä vaikuttaneet juurikaan tuloksiin.

FEM-mallin perusteella muotin sivupinnan ulospäin siirtämisellä voitaisiin saada painejakauma muita rengasaihiota vastaavaksi ja tällä myös estettäisiin rengasaihion sivupinnan irtoaminen analyysien aikana. Jatkossa tämä pitäisi verifioida.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Automobile and transport engineering
Automobile and industrial vehicle engineering

KINNUNEN, VILLE:
Examination of Green Tire: Mold and Shape

Bachelor's thesis 55 pages, appendices 1 pages
October 2016

The purpose of this thesis was to examine the effects of the curing process on a 225/40 R18 green tire inside of a mold. The theory chapter consists of information about the tires, the tire manufacturing process, tire molds, rubber, the finite element method (FEM) as well as the Abaqus Software. After this the design of the axisymmetric green tire cross section 2D-model was created. The model was created using the finite element method. Three different verifications were completed as a way of investigating the reliability of the FEM-model. In conclusion six different green tires were modelled to find the differences in behavior in comparison to the initial green tire. The work was carried out for Nokian Tires Corporation.

The results of the verification showed that the green tire 2D-model was reliable. Pressure distribution on the sidewall of the 225/40 R18 tire was different in comparison to other tires. Moreover, during the curing analysis, the sidewall disengaged from the mold whilst using the initial green tire. The narrowest part of the tire's sidewall mostly formed close to the junction between the mold surface and mold sidewall. The shrinkage in the steel belts and cords depended on the tire profile, the tire width and the tension of the cords before the curing.

The simplification of the FEM-model as well as the measuring equipment used, caused some errors in relation to the calculation results. In conclusion, the errors were very minor and there was no remarkable influence on the results.

The findings indicate that the pressure distribution should be improved in the 225/40 R18 tire. By modifying the shape of the mold in the FEM analysis the initial green tire achieved the desired pressure location and level. Also, the sidewall disengagement was avoided. In order to confirm the reliability of this thesis verification is required to be done in the future.

Key words: tire, material, curing, finite element method, analysis

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	TEORIA	8
2.1	Rengas.....	8
2.1.1	Pääkomponentit.....	9
2.1.2	Rakennetyypit	10
2.2	Renkaan valmistusprosessi	11
2.2.1	Komponenttien valmistus	12
2.2.2	Kokoonpano	13
2.2.3	Paisto	14
2.3	Rengasmuotti	14
2.3.1	Tyypit	15
2.3.2	Suunnittelu	15
2.4	Kumi ja sen ominaisuuksien tutkiminen.....	16
2.4.1	Elastisuus ja viskoosisuus	17
2.4.2	Lujuus ja kovuus	17
2.4.3	Vulkanoituminen.....	18
2.4.4	Reometri.....	18
2.4.5	Reometrikäyrä.....	19
2.5	Elementtimenetelmä	20
2.5.1	Periaate.....	21
2.6	Abaqus	22
2.6.1	Laskenta ympäristöt	23
2.6.2	Materiaalimalli	23
2.6.3	Laskentamenetelmä.....	24
3	RENGASAIHION FEM-MALLINNUS.....	27
3.1	2D-mallin luominen.....	27
3.2	Verkotus.....	29
3.3	Vahvikekuidut.....	30
3.4	Materiaali	31
3.5	Muotti.....	32
3.6	Reunaehdot	33
3.7	Analyysi	34
3.8	Analyysi paistotyynyllä ja poikkileikatulla rengasaihiolla.....	35
4	FEM-MALLIN VERIFIOINTI	37
4.1	Teräsvyöt	37
4.2	Paistokoe.....	38

4.3	Painekalvotesti	38
5	TULOKSET	40
5.1	Analyysi kuroumilla	40
5.2	Paistotyyny ja koko rengasaihio	40
5.3	Verifiointi.....	42
5.3.1	Teräsvyöt.....	42
5.3.2	Paistokoe	42
5.3.3	Painekalvotesti	43
5.4	Rengasaihoiden analyysien vertailu	45
5.4.1	Painejakauma	45
5.4.2	Kutistumat	46
5.4.3	Kapein kohta	47
5.4.4	Analyysi vaiheittain	47
6	TULOSTEN TARKASTELU	48
6.1	Laskentaan vaikuttavat tekijät	48
6.2	Verifiointiin liittyvät virheet	48
7	POHDINTA.....	50
	LÄHTEET	53
	LIITTEET	55
	Liite 1. Kutistumat analyyseissa.....	55

LYHENTEET JA TERMIT

Abaqus	Abaqus elementtimenetelmäohjelmisto
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
JLB	Jointless Band, tekstiilikoordikerros
SOT	sidewall over tread, sivupinta pinnan yli
TOS	tread over sidewall, pinta sivupinnan yli
B	venymä-siirtymä matriisi
C_{10}	neo-Hooke materiaaliparametri
D	materiaalimatriisi
D_1	neo-Hooke materiaaliparametri
ε	venymä
ε^{th}	lineaarinen lämpölaajenemisvenymä
F^N	voimakomponentti
\bar{I}_1	ensimmäinen jännitys invariantti
J^{el}	kimmainen tilavuussuhde
J	kokonaistilavuussuhde
M	muuttuja
N	muuttuja
q	elementin siirtymävektori
t10	10 prosentin vulkanoitumisaste
t90	90 prosentin vulkanoitumisaste
u^M	muuttujan M arvo
$U(\varepsilon)$	muodonmuutosenergiapotentiaali
λ_1, λ_2 ja λ_3	pääjännityksiä
σ	jännitys

1 JOHDANTO

Muotin ja rengasaihion muodot vaikuttavat merkittävästi paistoprosessin onnistumiseen ja niillä voidaan parantaa huomattavasti tuottavuutta. Tämän työn tavoitteena on tutkia miten kokoluokan 225/40 R18 rengasaihion muotoon päädytään ja miten se sopii muottiin. Rengasaihiota tutkitaan Abaqus-elementtimenetelmäohjelmalla. Työ suoritetaan Nokialla maailman pohjoisimmalle renkaanvalmistajalle, Nokian Renkaat Oyj:lle.

Shendeldin, Skiden ja Bodnerin (2002) mukaan suurin osa renkaiden vioista johtuu renkaan valmistusprosessista. He mallinsivat kahden renkaan valmistusprosessin elementtimenetelmäohjelmalla ja totesivat sen hyödyllisyyden käytännön ongelmien ratkaisemisessa. (Shendeld ym. 2002, 26–29.) Myös Surendranath ja Kuessner (2003) testasivat renkaan epälineaarista FEM-analyysiä. Heidän mukaan analyysissä voidaan optimoida kaapelin halkaisijaa, sivupinnan eri muotovariaatioita tai tutkia esimerkiksi jännitystä, venymää, muodonmuutosta, ominaistaajuutta ja kontaktipainetta. (Surendranath & Kuessner 2003, 16–18.) Nokian Renkailla ei ole koskaan tehty vastaavaa analyysiä.

Työssä käydään läpi renkaan rakenne ja valmistus, elementtimenetelmä, Abaqus-elementtimenetelmäohjelma, rengasaihion 2D-FEM-mallinnus ja paistoanalyysi. Lisäksi FEM-malli verifioidaan ja vertaillaan useamman rengasaihion käyttäytymistä erimuotoisissa muoteissa. Vertailun avulla pyritään löytämään eroavaisuuksia rengasaihioiden välillä. Lopuksi pohditaan millaisia muutoksia muottiin kannattaisi tulevaisuudessa tehdä.

2 TEORIA

Rengasaihion mallinnuksen ja paistoprosessin analyysin ymmärtämiseksi on tärkeää tietää perusteita renkaasta, kumista, muotista, elementtimenetelmästä ja käytettävästä ohjelmistosta. Tässä osiossa käsitellään ensin renkaanrakennetta ja sen komponenttien valmistusta. Siitä siirrytään rengasaihion kokoonpanoon ja paistoon, jossa rengas saa varsinaisen muotonsa. Tämän jälkeen syvennytään tarkemmin kumin erityisiin ominaisuuksiin ja niiden mittaamenetelmiin. Sitten käsitellään muotteja, jonka jälkeen päästää elementtimenetelmään ja Abaqus-elementtimenetelmäohjelmaan. Abaqus käydään pääpiirteittäin läpi ja tutustutaan analyysissä käytettyyn materiaalmalliin ja laskentametodiin.

2.1 Rengas

Rengas on painesäiliö, jonka pääasiallinen tarkoitus on luoda hyvä kontakti ajoneuvon ja tien välille. Rengas toimii myös osana alustan jousitusta, vastaavasti kuin jousi ja iskunvaimennin, mitkä ottavat vastaan tiestä aiheutuvia iskuja. Yleensä yhden renkaan tiekontaktin pinta-ala on keskiverto miehen käden kokoinen. Rengas koostuu kuiduista, teräksestä, kumeista, sekä orgaanisista ja epäorgaanisista kemikaaleista. Tyypillisesti renkaassa käytetään noin 60 raakamateriaalia, kuten monia polymeerejä, nokea, silikaa, vahaa, vulkanoimisaineita, kovettimia, väriaineita ja adheesio- parantajia. Materiaalien käytössä joudutaan tekemään kompromisseja, sillä yhden ominaisuuden parantaminen voi heikentää toista. Esimerkiksi kuivapidon ja ajettavuuden parantamisen optimointi voi heikentää vesi-/lumipitoa, kulumiskestävyyttä tai polttoainetaloudellisuutta. Myös materiaalin hinta ja valmistettavuus ovat huomioitavia seikkoja. (Gent & Walter 2005, 2–3,6; Mark, Erman & Eirich, 2005, 660.) Tämän kappaleen avulla opitaan millaisista kerroksista rengas koostuu ja mikä on niiden tarkoitus renkaassa. Kerrotaan myös rengastyypeistä, jotta saadaan käsitys millainen rakenne on tässä työssä analysoiduilla radiaalirenkailla.

2.1.1 Pääkomponentit

Renkaassa on alueita, joista käytetään erityisnimiä. Tekstissä esiintyy useasti renkaan olkapää- ja jalka-alue, jonka vuoksi niiden sijainti on esitelty kuvassa 1.



KUVA 1. Renkaan alueita (Nokian Renkaat Oyj)

Renkaan pinta on suoraan kontaktissa tienpintaa vasten. Se suojaa renkaan runkoa ja toimii kulutuspinna. Pinnan kumiseoksilla ja muotoilulla voidaan vaikuttaa muun muassa pito-ominaisuuksiin, vesiliirtoon, lämmöntuottoon, meluun ja ajettavuuteen. Renkaan sivupinnan joustava kumi suojaa taas renkaan runkoa ja parantaa ajettavuutta. Sivupintaan on merkitty kaikki renkaan oleelliset tiedot ja se on tehty hajoamisen ja halkeamisen alkamista vastustavasta kumiseoksesta. Lisäksi se suojaa renkaan sivua ilmastoinnista vastaan. Kolmioliuska suojaa kaapelia ja auttaa pitämään sitä paikallaan. Kaapeli on tehty jäykistä teräslangoista. Se varmistaa renkaan pysyvyyden vanteessa, sekä sileän ja turvallisen ankkuroinnin rungolle, joka on renkaan tärkein osa. Runko koostuu koordikuodoksesta ja sen tehtävänä on vaimentaa iskuja, kantaa pystysuoraa voimaa ja ilmapainetta. Innerliner on butyylistä valmistettu kumikerros rungon sisäpuolella. Se estää ilmaa läpäisemästä runkoa sisäkumittomissa renkaissa. JLB (Jointless Band) on taas renkaan akselin suuntainen ”saumaton” tekstiilikoordikerros pinnan ja päällimmäisen teräsvyön välissä. Tarkoituksena sillä on estää keskeiskiihtyvyydestä aiheutuvaa renkaan laajenemista. JLB toimii myös suojana ja erottimena renkaan rungon ja pinnan välissä, sekä vai-

mentaa iskuja. Teräsvyöt koostuvat päällekkäisistä teräskoordeista ja ne vahvistavat renkaan pinnan jäykkyyttä. (Prekop ym. 2006, 8,35; Mark ym. 2005, 624; Hankook.) Kuvassa 2 näkyy edellä mainitut komponentit.

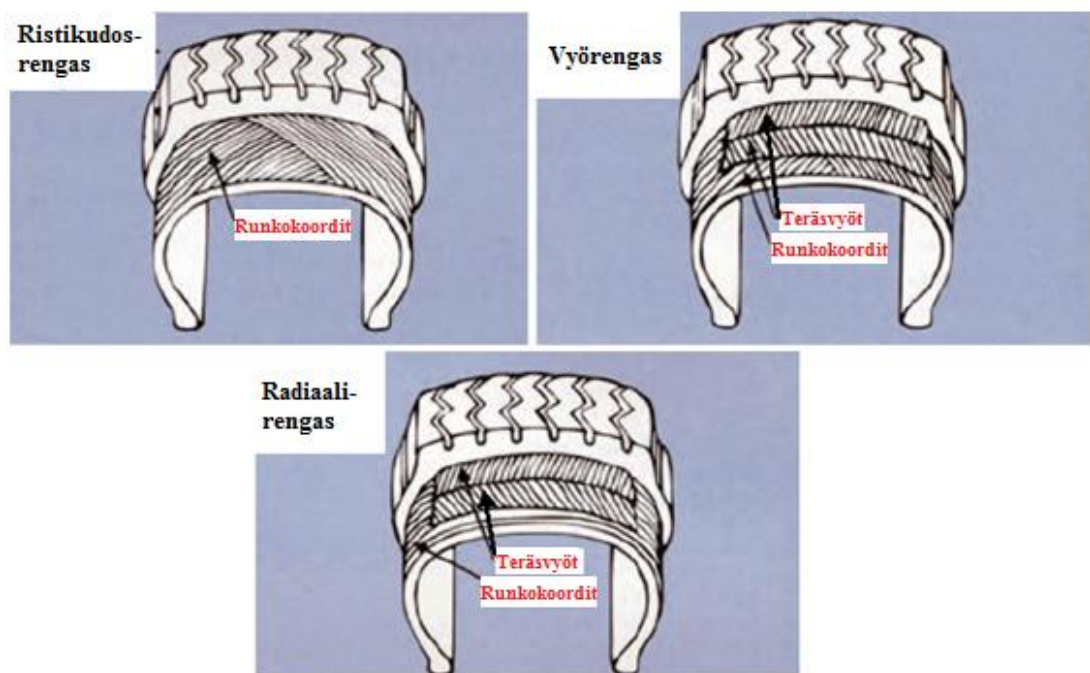


KUVA 2. Renkaan rakenne (Nokian Renkaat Oyj)

2.1.2 Rakennetyypit

Rengastyyppejä on kolme, ja ne ovat nimetty niiden rakenteen perusteella. Ristikudos- ja vyörenkaissa runkokoordit ovat alle 90 asteen kulmassa (yleensä 32–40°), radiaalirenkaassa taas 90 (+0°/-5°) asteen kulmassa renkaanpinnan keskilinjasta katsottuna. Vyörensä tulla välirenkaaksi, kun siirryttiin ristikudosrakenteesta radiaalirakenteeseen. Radiaalirenkaiden suuren kysynnän vuoksi renkaanvalmistajien tuotantokapasiteetti oli keskitetty ristikudosrenkaisiin. Radiaali- ja vyörenkaan ajettavuuden sekä kulumiskestävyyden parantamiseksi renkaan pintaa on jäykistetty lisäämällä vähintään kaksi terävyötä

(kuva 3). Ristikudosrenkaassa tätä vahvistavaa vyötä ei ole, joka tekee renkaan pinnasta joustavan, mutta toisaalta jäykistää sivupintaa, jolloin on pienempi riski sivupinnan puhkeamiselle. Ohjatessa ristikudos- tai vyörengasta niiden runkokoordien välille aiheutuu leikkautumista. Tästä syntyy haitallista lämpöä, mikä lyhentää käyttöikää. Radiaalirenkaassa runkokoordien kulmasta johtuen saadaan vähennettyä lämmön muodostumista. Lisäksi suorituskyky paranee kovissa nopeuksissa sekä vierintävastus alenee. Haittapuolina radiaalirenkaassa on sen monimutkainen rakenne, joka lisää valmistuskustannuksia. Radiaalirenkaassa on jopa yli kaksikymmentä komponenttia ja yli viisitoista eri kumiseosta. (Gent & Walter 2005, 2–4; Prekop ym. 2006, 9–11)

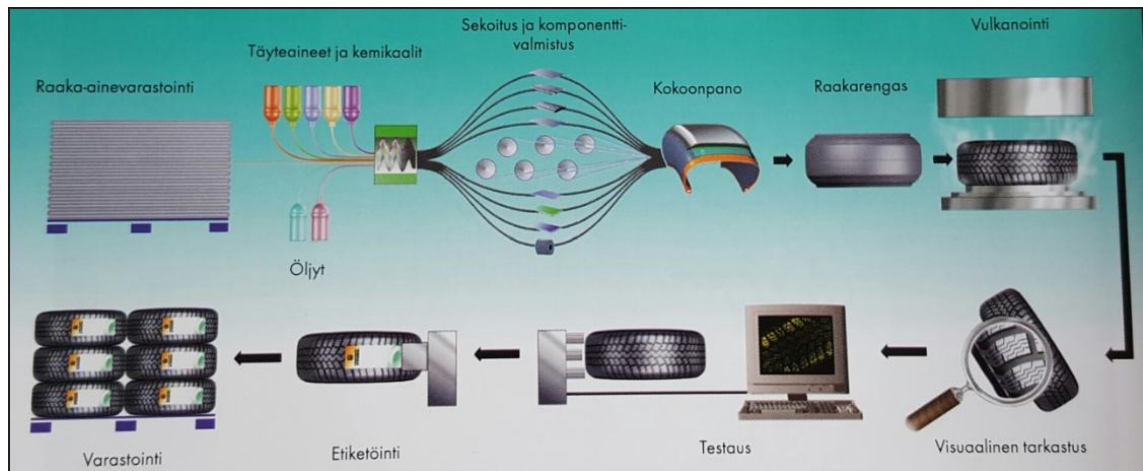


KUVA 3. Rengastyypit (Gent & Walter 2005, 3, muokattu)

2.2 Renkaan valmistusprosessi

Renkaan valmistusprosessi on valmistajasta riippuvainen ja yhdellä valmistajalla voi olla käytössä monta eri teknologiaa. Tässä työssä käsitellään yleisesti tunnettua tapaa (kuva 4). Perehdytään työn kannalta kiinnostaviin osioihin eli rengasaihion valmistukseen kom-

ponenttitasolta aina paistoon asti. Komponenttien valmistus- ja kokoonpanoprosessin tietäminen auttavat rengasaihion mallintamisessa. Paistoprosessin avulla tehdään varsinainen FEM-analyysi.



KUVA 4. Renkaan valmistusprosessi Nokian Renkaat Oyj:ssä (Palo-oja & Willberg 1998, 148)

2.2.1 Komponenttien valmistus

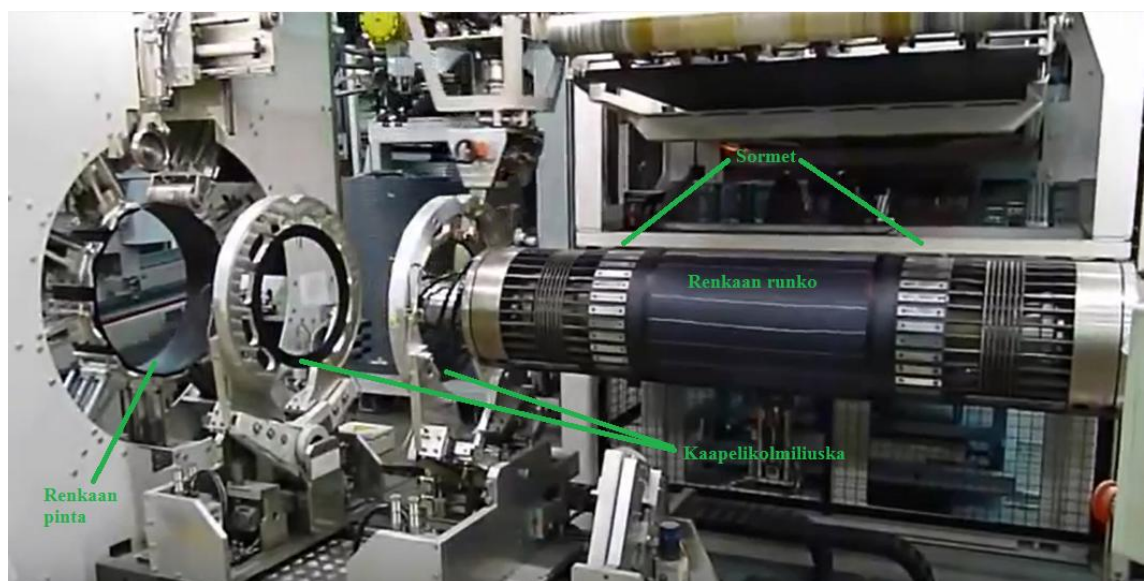
Alihankkijoiden kautta saadaan perusraaka-aineet. Niistä tehdään näyte, joka testataan ja koodataan laboratoriossa. Tämän jälkeen materiaalia valmistetaan tuotannossa. Haluttu yhdistelmä erä (yleensä 180kg-500kg) laitetaan suljettuun sekoittimeen, jonka nopeus, lämpötila, sekoitusvoima ja pyörimisaika ovat tarkoin määriteltäviä. Kun yhdistelmä on saatu sekoitettua varastointia tai myöhempää sekoitusta varten, jokainen erä tasataan levyiksi levyaukiovalssaimella tai suulakepuristimella. Lopuksi ne leikataan pelleteiksi. (Gent & Walter 2005, 20.)

Vahvikkeiden valmistukseen on olemassa monta eri tapaa, kuten kalanterointi ja extruusio. Esimerkiksi kalanteroinnissa teräslangat ja esikäsitellyt vahvikekuidut (kiedonta, liima ja lämpökäsittely) ajetaan kalanterin läpi, jossa ne jäävät kumien väliin. Kalanteroinnin jälkeen teräsvyöt ja runkokoordit (radiaalirenkaassa) leikataan paloiksi, käännetään haluttuun kulmaan ja liitetään yhteen. Ensimmäisen ja toisen teräsvyön teräslankojen kulmat ovat vastakkaiset ja runkokoordin polyesterillä kulma on yleensä 90 astetta. JLB:n polyamidilangat kulkevat renkaan pitkittäissuunnassa, jolloin kulmaa ei tarvitse

kääntää. Kaapelin teräslangat kumitetaan puristusmännällä. Sitten kaapeli kelataan istukkaan haluttuun muotoon ja halkaisijaan, sekä siihen liitetään yleensä kolmioliuska renkaan kasaamisen nopeuttamiseksi. Kumikomponentit, kuten sivupinta ja pinta muodostetaan ruuvipuristimella, pursottamalla kumi muottisuulakeen (suuraudan) läpi. Tunnistamisen ja laadun tarkkailun takia pursotetut kumit ovat merkattu värikoodatuilla raidoilla ja kirjaimilla. (Gent & Walter 2005, 21–23.)

2.2.2 Kokoonpano

Innerliner ja sivupinta yhdistetään yleensä toisiinsa ennen runkorummulle tuloa. Niiden päälle kiedotaan runkokoordit ja teräsvyöt. Seuraavaksi renkaan runkoon asetetaan kaapelikolmioliuska yhdistelmät. Sitten sivupinta ja osa runkokoordista taivutetaan kaapelin yli renkaan runkoa vasten mekaanisella- tai tyynyrummulla. Vyörummulla yhdistetään JLB ja pintakerros. Lopuksi pintakerros siirretään rungon päälle siirtorenkailla ja runko venytetään paineen avulla pintaan kiinni. Tuloksena saadaan rengasaihio (Gent & Walter 2005, 24; Palo-oja & Willberg 1998, 148). Kuvassa 5 näkyy automaattinen kokoonpanolinjasto. Siinä renkaanrunko on valmiiksi kiedottu mekaanisen runkorummun ympärille. Mekaaninen rumpu liikkuu vasemmalle, jossa siihen kiinnitetään kaapelikolmioliuska yhdistelmät. Tämän jälkeen sivupinnat taitetaan mekaanisen rummun ”sormilla” kaapelin yli ja lopuksi pinta kiinnitetään renkaan runkoon.



KUVA 5. Kuvakaappaus automaattisesta kokoonpanolinjastosta (VMI MXX tire building, Youtube 2014, muokattu)

2.2.3 Paisto

Kun rengasaihio on valmis, se siirtyy paistopuristimeen (kuva 6), jossa vulkanoituminen tapahtuu. Paistopuristimessa on kaksi rengasmuottia, tyhjiö-, vesi- ja höyrylinjat, kuljetin sekä automaattinen lastauslaite, joka asettaa rengasaihiot muotin keskelle (Gent & Walter 2005, 25). Nokian Renkailla muotin keskellä oleva paistotyyny puristuu rengasaihion sisäpintaa vasten luoden siihen esipaineen. Tämän jälkeen muotin yläpinta painautuu rengasaihion sivupintaa vasten ja samalla paistotyynyyn tulee venytyspaine. Sitten muotin segmentit painautuvat rengasaihion pintaa vasten ja paistotyynyyn muodostuu noin 15 baarin paine. Paistotyynyn sisällä ja muotin ympärillä kiertää kuuma vesihöyry. Paisto kestää yleensä noin 10-15 minuuttia. Paistoaajat, lämpötilat ja paineet riippuvat käytetyistä kumiseoksista ja rengaskoosta.



KUVA 6. Paistopuristin (China Good Quality... 2014–2016, muokattu)

2.3 Rengasmuotti

Rengasmuotilla on suuri vaikutus renkaan lopullisen muodon kannalta. Tässä kappaleessa käsitellään kahta erityyppistä rengasmuottia ja kerrotaan rengasmuotin suunnitteluperusteista. Työn kannalta on tärkeää tietää perusteita muoteista.

2.3.1 Tyypit

Muotteja on olemassa täysin pyöreitä kaksiosaisia, 8-9 osaisia segmenttimuotteja ja vielä useammasta segmentistä koostuvia puzzle-muotteja (kuva 7). Puzzle-muoteissa ilma pääsee poistumaan segmenttien väliin jäävien pienien rakojen kautta, perinteisten venttiilien sijasta (Herbert.) Segmenteistä koostuvat muotit ovat monimutkaisempia ja kalliimpia. Segmenttimuotteja varten rengasaihiosta voidaan tehdä lähemmäksi muotin halkaisijan kokoinen ja sen ei tarvitse venyä niin paljoa täyttääkseen muotin. Tämä vähentää esimerkiksi võiden venymistä. Lisäksi paiston päättyessä segmenttimuotit vetäytyvät suoraan renkaasta pois päin, mikä pienentää renkaan muokkautumista. Tämä on tärkeää etenkin matalaprofiilisilla renkailla. Kaksiosaisessa muotissa muotin puolikkaiden auetessa renkaanpinta muokkautuu joitain asteita, mikä vaikeuttaa rengasprofiilien tekemistä. (Gent & Walter 2005, 25.)

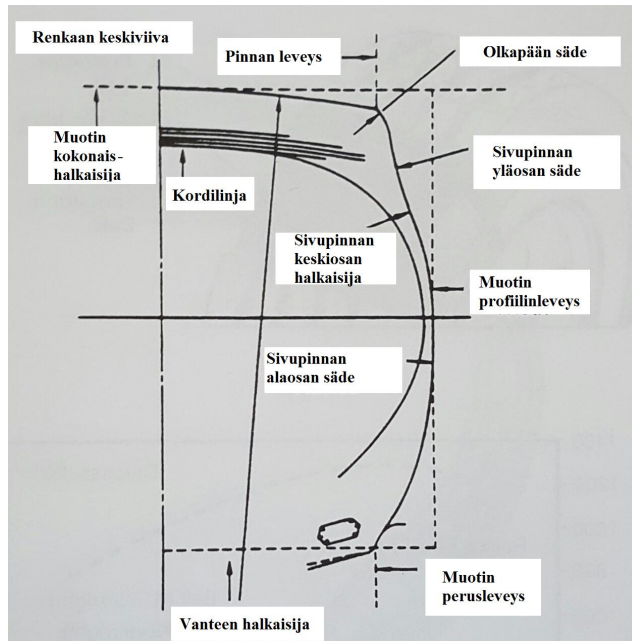


KUVA 7. Vasemmalla kuvakaappaus kaksiosaisesta muotista (Hunkins 2015), keskellä 8-osaisesta segmenttimuotista (Rongda) ja oikealla kapeasta segmentistä (Herbert)

2.3.2 Suunnittelu

Renkaan muotin suunnittelu alkaa määrittämällä paineistetun renkaan halutut mitat. Pinnan, sivupinnan, olkapään ja kaapelin mitat voidaan arvioida laskennallisesti saadun runkokoordilinjan ja äärimittojen perusteella. Tärkeimmät alueet ovat vyöt, kaapelialue, sekä runkokoordin kireys. (Gent & Walter 2005, 627–628.) Muotin pintaprofiilin, sen uran syvyyden sekä olkapään ja keskustan säteellä voidaan vaikuttaa merkittävästi renkaan

suorituskykyyn (Gent & Walter 2005, 10). Kuvassa 8 näkyy tietokoneavusteisesti mallinnettu muottimuoto.



KUVA 8. Muottimuoto (Mark ym. 2005, muokattu)

Radiaalirenkailla sivupinnan kaaren säde on suoraan verrannollinen sivupinnan kireyteen. Tämä mitta on yhteydessä etäisyyteen vyön reunasta kaapeliin ja sivupinnan kordien pituuteen. Kaaren säteestä voidaan arvioida koordinkireys. Sivupinnan koordeihin kohdistuvat voimat vetävät vyönreunoja säteittäisesti sisäänpäin. Pienellä voimalla (löysät koordit) sivupinnasta tulee kaarevampi kun taas suurella voimalla sivupinnasta tulee tasaisempi (kireät koordit) ja ajettavuus paranee. (Gent & Walter 2005, 219–220.)

2.4 Kumi ja sen ominaisuuksien tutkiminen

Kumilla on monia ominaisuuksia, jotka muuttuvat merkittävästi vulkanoitumisen aikana. Tässä kappaleessa käsitellään kumin tärkeimpiä ominaisuuksia ja mittausmenetelmiä. On erittäin tärkeää tietää kumista ja sen ominaisuuksista, jotta voidaan ymmärtää sen käyttäytymistä ja osata myöhemmin määrittää analyysia varten tarvittavat materiaaliarvot.

2.4.1 Elastisuus ja viskoosisuus

Kumin yhtenä tärkeänä ominaisuutena on sen elastisuus. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kumia voidaan venyttää esimerkiksi 1000 % ja venytyksen loppuessa se palautuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Elastisuus johtuu kumin erityisestä molekyyli- rakenteesta, epäsymmetrisyydestä ja sidosten vapaasta kiertymästä. (Laurila 2007, 25.)

Toisena tärkeänä ominaisuutena voidaan pitää kumin viskoosisuutta. Sitä voidaan verrata reiälliseen mäntään, jota liikutetaan nesteellä täytetyssä sylinterissä. Mitä nopeammin mäntä liikkuu sitä enemmän neste vastustaa liikettä. Liikkeen loputtua mäntä jää paikalleen ja muodonmuutos on tapahtunut. Elastomeerien viskoosisen muodonmuutoksen mahdollistaa molekyyli- ketjujen liukuminen toistensa ohi ja järjestyminen tämän jälkeen. Vulkanoimattomalla kumilla liian alhainen viskositeetti aiheuttaa ongelmia aihion muodonpysyvyydessä ja viskositeetin ollessa liian suuri kumi ei virtaa muotissa kunnolla ja sen muotoilu on vaikeaa. Viskositeettiä kuvataan tietyssä lämpötilassa mitattavalla Mooney-arvolla. Vulkanoimattomilla elastomeereillä viskositeetti on 10000–60000, kun vedellä se on 1. (Laurila 2007, 28,32.)

2.4.2 Lujuus ja kovuus

Kumin lujuutta testataan vetokoneella, jossa määrätyn muotoista kumikappaletta venytetään niin kauan, että se katkeaa. Vetolujuus on voima poikkipinta- alaa kohden ja murtovenymä on venymä näyte- kappaleen katkeamishetkellä. Kumilla vetolujuus on yleensä 7–30 MPa:a ja murtovenymä 300–700 %. (Laurila 2007, 34.)

Kumin kovuus voidaan mitata painamalla sitä neulamaisella kärjellä määrätyllä voimalla tietyn aikaa. Syntyneen painauman syvyys kertoo kumin kovuuden, jota mitataan yleensä Shore-asteikolla. Shore-asteikossa arvo on pienimmillään 20 ShA (erittäin pehmeä) ja suurimmillaan 80 ShD (kivikova). (Laurila 2007, 33.) Nokian Renkailla kumien kovuus on 50-90 ShA.

2.4.3 Vulkanoituminen

Vulkanoituminen on kemiallinen prosessi, jossa kumisekoitus muuttuu muokattavasta plastisesta massasta kimmoisaksi elastiseksi materiaaliksi. Esimerkiksi rikkivulkanoinnissa rikkirenkaan auetessa elastomeeriketjujen väliin syntyy erimittaisia rikkisilloja ja muodostuu kolmiulotteinen verkko. (Laurila 2007, 84, 87.)

Renkaiden valmistaminen ilman vulkanointia ei olisi mahdollista. Vulkanoinnottoman kumin muodot muuttuvat helposti ja koostumus voi olla jopa sama kuin purukumilla. Charles Goodyear keksi vulkanoinnin (luonnonkumin lämmitys rikillä) vuonna 1839 ja vuotta myöhemmin Thomas Hancock kuitenkin patentoi vulkanoinnin, tietämättä Goodyearin kokeista mitään. Nykyään käytössä on monia synteettisiä kumeja ja aineita rikin sekä luonnonkumin lisäksi. Yleisin vulkanointimenetelmä on muottivulkanointi, jossa kappale vulkanoidaan tietyssä paineessa ja lämpötilassa, yleensä 150–200°C asteessa. (Laurila 2007, 16,168; Mark ym. 2005, 321.)

Verkottumistiheyden (poikkisidosten lukumäärä tiettyä yksikköä kohden) kasvaessa vulkanoidun kumin kovuus ja moduuli kasvavat. Vetolujuus, sitkeys, repimislujuus ja väsymisenkesto kasvavat maksimiarvoon, jonka jälkeen ne alkavat laskemaan, vaikka verkottumistiheys kasvaisikin. Verkkoutumistiheys ja vulkanoinninnopeus ovat riippuvaisia kiihdyttäjistä eli aktivaattoreista, rikin määrästä ja laadusta sekä elastomeereistä. Kaikki vulkanoinnin aktivaattorit sisältävät tautomeroituvan kaksoissidoksen. Eli kaksoissidos (π -elektronit) ja protonit liikkuvat samanaikaisesti muuttaen toisikseen kaksi saman koostumuksen omaavaa molekyyilirakennetta. Lyhyet rikkisillat ovat optimaalisia, jos halutaan saada lämmönkestävää tuotetta eli vulkanisaattia. (Laurila 2007, 84,88.)

2.4.4 Reometri

Sekoituksen vulkanoimisominaisuuksien ja viskositeetin mittaamista varten käytetään roottoritonta mittalaitetta, nimeltä Reometri (ISO 6502) (kuva 9). Siinä koepala asetetaan suljettuun ja lämmitettyyn kammioon. Kammiossa metallilevyt uppoutuvat näytepalaan, alamuotti värähtelee kiertyen edestakaisin akselinsa ympäri ylämuotin pysyessä paikallaan. Reometri ylläpitää värähtelyn amplitudin vakiona kasvattamalla vääntömomenttia.

Vääntö on verrannollinen elastisuuden alhaiseen venymämoduuliin. Väännön kasvua voidaan verrata muodostuneiden siltasidosten määrään per kumin tilavuusyksikkö. Koska mitataan vakiolämpötilassa, viskositeetin vaikutus tuloksiin on vähäinen. (Laurila 2007, 188; Mark ym. 2005, 325–327.)

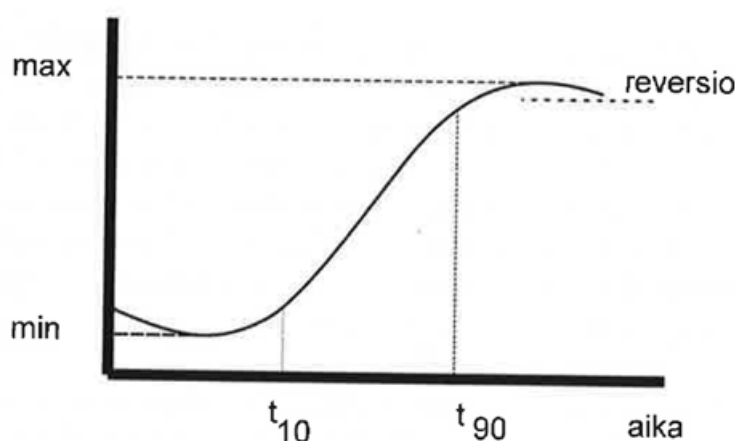


KUVA 9. Kuvakaappaus reometristä (Anton Paar 2016)

2.4.5 Reometrikäyrä

Reometrillä saadaan selville viskoosinen ja elastinen vääntökäyrä. Viskoosisesta käyrästä selviää millainen on sekoituksen verkottumistiheys ja täyttömäärä. Elastinen vääntökäyrä on varsinainen reometri- eli vulkanoitumiskäyrä. Reometrikäyrästä nähdään siltasidostentiheys aikaan verrattuna tietyssä lämpötilassa. Toisin sanoen nähdään miten siltasidokset muodostuvat ja tämän avulla voidaan optimoida paistotapahtumaa. Vulkanoitumiskäyrän alussa lämpötila aiheuttaa näytteeseen viskositeetin alenemista ja vastustava voima vähenee. Tämän jälkeen syntyy poikkisitoutumisreaktioita ja voima kasvaa vulkanoitumisen päättymiseen asti. Sekoituksen turvallista käsittelyaikaa tietyssä lämpötilassa

ilmaistaan Scorch-ajalla. Yleensä siitä käytetään t_{10} arvoa, joka kertoo milloin 10 prosentin vulkanoitumisaste on saavutettu. Optimivulkanoitumisajasta käytetään t_{90} arvoa, jolloin vulkanoitumisaste on 90 prosenttia. Vulkanoitumiskäyrän maksimiarvosta voidaan päätellä vulkanisaatin mekaanisia ominaisuuksia ja minimiarvosta sekoituksen käsiteltävyyttä virtauksessa. Vulkanoitumisnopeus saadaan käyrän jyrkkyydestä. Jos poikisidoksia syntyy vähemmän kuin lämmöstä aiheutuvaa pilkkoutumista puhutaan reversiosta (kuva 10). Eli jos vulkanointia jatkekaan liian pitkälle, vulkanointikäyrä alkaa laskemaan. Vulkanointi on lämpötilasta riippuvainen. Mitä suurempi lämpötila on sitä lyhyempi on vulkanoitumisaika. Käyrää yleensä kuvataan mallilla, jossa on lämpötilavakio, joka on yleensä 1.5–2.5 sekoituksesta ja elastomeeristä riippuen. Esimerkiksi lämpötilavakion ollessa 2 ja lämpötilan noustessa 10 astetta vulkanoitumisaika puolittuu. Kun taas lämpötilan laskiessa 10 astetta vulkanoitumisaika taas kaksinkertaistuu. (Laurila 2007, 85–86, 188; Mark ym. 2005, 327–328.)



KUVA 10. Reometrikäyrä (Laurila 2007, 85)

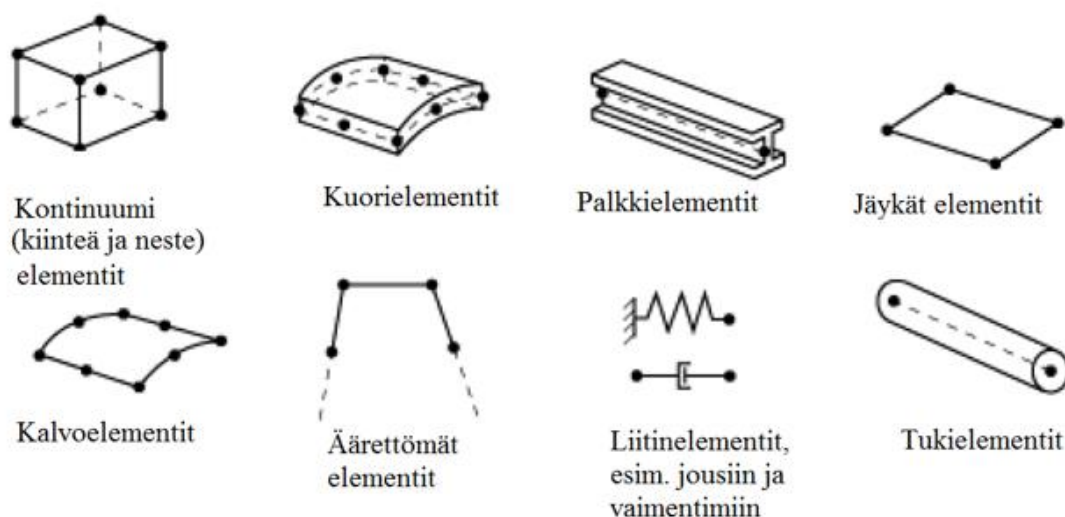
2.5 Elementtimenetelmä

Lujuusopissa voidaan laskea yksinkertaisissa tapauksissa jännitys-, muodonmuutos ja siirtymätilakenttä perusdifferentiaaliyhtälöiden avulla. Laskujen mennessä monimutkaisemmiksi tarvitsee käyttää likimääräistä ratkaisumenetelmää, joista elementtimenetelmä on paras. Se on numeerinen ratkaisumenetelmä, joka perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen. Sitä käytettiin aluksi lentokoneteollisuudessa Yhdysvalloissa jo

1950-luvulla, josta se levisi muille tekniikanaloille. (Lähteenmäki 2012–2013a, 1.1–1.2.)
Tässä kappaleessa saadaan perusidea elementtimenetelmästä.

2.5.1 Periaate

Elementtimenetelmässä geometriaa yksinkertaistetaan jakamalla se äärellisiin osiin, joita kutsutaan elementeiksi (kuva 11). Kolmiulotteisissa malleissa käytetään yleensä neli-, viisi tai kuusitahokkaita elementtejä, 2D-malleissa kolme- ja nelisivuisia tasoelementtejä ja 1D-malleissa sauva- ja palkkielementtejä. Näiden lisäksi on olemassa paljon erityistar-koituksiin olevia elementtejä, kuten kontakti- ja liitinelementit. (Lähteenmäki 2012–2013a, 1.1–1.2.)



KUVA 11. Yleisimmin käytetyt elementit (Abaqus 6.14 Analysis guide, 27.1.1–1, muokattu)

Kappale voidaan jakaa erikokoisiin, muotoisiin ja materiaaliominaisuuksiltaan poikkeaviin elementteihin. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiin pisteistä (solmut), jolloin muodostuu elementtijoukko (elementtiverkko). Etenkin pinta- ja solidimalleilla elementtiverkko ei pysty täysin jäljittämään kappaleen muotoja ja aiheuttaa pieniä laskennallisia virheitä. (Lähteenmäki 2012–2013a, 1.2.)

Elementtimenetelmässä lasketaan ensin solmusuureet, joiden avulla se pystytään ratkaisemaan muut suureet yleensä interpoloimalla. Solmusuureiksi kutsutaan lujuuslaskennan kannalta tärkeitä elementtiverkon solmuja, jotka jakaantuvat voima- ja siirtymäsuureisiin. Käytettävät solmusuureet riippuvat valitusta elementtityypistä. Voimasuureita ovat kannattimen poikkileikkauksen rasitukset, pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet ja jännityskomponentit. Siirtymäsuureita ovat taas rotaatio- ja translaatiosiirtymät. Solmusuureiden laskemiseen on olemassa monia ratkaisumenetelmiä, jotka pääosin poikkeavat siinä missä järjestyksessä solmusuureet lasketaan. Ratkaisumenetelmistä tehokkain tapa on määrittää ensi solmusiirtymät (siirtymämenetelmä). (Lähteenmäki 2012–2013a, 1.4, 1.7.)

Ensin lasketaan siirtymät, siirtymistä venymät ja venymistä jännitykset. Työssä ollaan kiinnostuneita deformaatiosta, jolloin materiaalmallin ei tarvitse olla niin tarkka ja silti siirtymät saadaan laskettua oikein. Kaavalla (1) on ilmaistu venymä- ja siirtymäsuhde. Elementin venymä ε lasketaan solmusiirtymien perusteella

$$\varepsilon = Bq, \quad (1)$$

jossa B on venymä-siirtymä matriisi ja q on elementin siirtymävektori. Jännitys saadaan laskettua kaavalla (2)

$$\sigma = DBq, \quad (2)$$

jossa D on materiaalmatriisi. (Chandrupatla & Belegundu 2002, 213.)

2.6 Abaqus

Abaqus on tehnyt tiivistä yhteistyötä rengasteollisuuden kanssa. Ohjelmisto tukee entistä enemmän renkaiden arviointia, se on kehittänyt muun muassa elementtejä, materiaalitekniologiaa ja analyysiprosesseja. Explisiitti ja implisiitti ratkaisijoiden sopeutuminen helpottaa analyysin järjestystä. Yhdellä ohjelmistopakettilla voidaan esimerkiksi tehdä simulaatio renkaan pyörähdysymmetrisen 2D-mallin täyttymisestä, 3D-jalanjälki simulaatiosta ja stationaaritilan vierintäanalyysistä (Surendranath ym. 2003, 16). Tässä kappaleessa

esitellään lyhyesti Abaqus, sekä kerrotaan mitä materiaali- ja laskentamallia tässä työssä käytettiin.

2.6.1 Laskenta ympäristöt

Abaquksessa voidaan käyttää Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit tai Abaqus/CFD työskentely-ympäristöjä. Abaqus standard käyttää implisiittistä ratkaisumenetelmää ja se on optimaalinen staattisiin, hitaisiin dynaamisiin ja pysyvän tilan liikeanalyysihin. Esimerkiksi voidaan tutkia tiivisteeseen kohdistuvan paineen tai lentokoneen komposiittirungon halkeaman etenemistä. Yksittäisessä simuloinnissa on mahdollista analysoida mallia sekä aika- että taajuusaluetta käyttäen. Esimerkiksi moottorinsuojan kiinnityksen analysointiin voidaan sisällyttää tiivistemekaniikkaa. Tässä analyysissä voidaan tutkia moottorin suojan esijännitystä, ominaistaajuutta tai moottorin aiheuttaman esijännitetyn kiinnikkeen värinän taajuusalueen mekaanista ja akustista vastetta. Abaqus/Explicit on taas mainio nopeisiin hetkellisiin dynaamisiin ja epälineaarisiin analyysihin. Hyvinä esimerkkeinä ovat auton kolarikestävyys, elektroniikan pudotustestien ja raakaraudan valssaus analyysit. Abaqus/Standard puolella tehtyä mallipohjaa voidaan usein jatkaa Abaqus/Explicit puolella ja päinvastoin. Abaqus/CFD on tarkoitettu virtauslaskentaan. Sillä voidaan ratkaista laminaarisia ja turbulenttisia, sekä lämmönjohtavuus tilanteita. (Dassault Systèmes 2016.)

2.6.2 Materiaalimalli

Konstitutiiviset eli materiaaliyhtälöt ovat määritetty kokeellisesti. Yhtälöt antavat muodonmuutos- ja jännityskomponenttien välisen matemaattisen yhteyden. Jos materiaaliominaisuudet eivät riipu suunnasta, materiaali on isotrooppinen. Kimmoisen materiaalin muodonmuutokset ovat palautuvia. (Lähteenmäki 2012–2013b, 5.) Tässä työssä käytettiin hyperelastista materiaalimallia, joka on selitetty alapuolella.

Hyperelastinen materiaalimalli on epälineaarinen ja isotrooppinen. Se soveltuu esimerkiksi kumeille ja muille elastomeerisille materiaaleille, joilla on välitön elastinen vaste suuriin jännityksiin asti. Oletuksena on, että hyperelastisen mallin käyttäytyminen on isotrooppista koko muodonmuutoksen ajan. Tällöin saadaan jännitysenergia invarianttien

funktiona muodostettua muodonmuutosenergiapotentiaali $U(\varepsilon)$. Tämä tarkoittaa materiaaliin varastoituneen jännitysenergian suhdetta materiaalin alkuperäiseen tilavuusyksikköön ja sillä kuvataan hyperelastisia materiaalimalleja. Abaqus käyttää muutamia erilaisia jännitysenergiapotentiaali kaavoja mallintaakseen lähes puristumattomia isotrooppisia elastomeerejä. Esimerkiksi Mooney-Rivlin, polynomi, alempi polynomi, Ogden, Yeoh, Marlow ja neo-Hooken kaavat. Tässä työssä käytettiin neo-Hooken mallia ja sen muodonmuutosenergiapotentiaali saadaan laskettua kaavalla (3)

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2, \quad (3)$$

jossa C_{10} ja D_1 ovat lämpötilasta riippuvaisia materiaaliparametrejä, J^{el} on kimmoisen tilavuussuhde ja \bar{I}_1 on ensimmäinen jännitys invariantti, joka lasketaan kaavalla (4)

$$\bar{I}_1 = (J^{-\frac{1}{3}}\lambda_1)^2 + (J^{-\frac{1}{3}}\lambda_2)^2 + (J^{-\frac{1}{3}}\lambda_3)^2, \quad (4)$$

siinä J on kokonaistilavuussuhde, λ_1 , λ_2 ja λ_3 ovat pääjännityksiä (Abaqus analysis user's guide 22.5.1). Jännitystilän normaalijännityksen ääriarvoja sanotaan pääjännityksiksi. Jos tiedetään pääjännitykset, niiden suunnat saadaan ratkaistua yksikkövektoriehdon ja suuntakosinien yhtälöryhmästä. Pääjännitykset ovat yleensä erisuuruisia ja niitä on aina kolme. Jos kuitenkin kaikki pääjännitykset ovat yhtä suuria, puhutaan pallomaisesta jännitystilasta. Jos taas kaksi pääjännitystä ovat yhtä suuria, on kyse sylinterimäisestä jännitystilasta. Pääjännitykset ovat kohtisuorissa tasoissa toisiaan vastaan. (Lähteenmäki 2008–2009, 12, 14, 18). Kimmoisen tilavuussuhde lasketaan kaavalla (5)

$$J^{el} = \frac{J}{(1+\varepsilon^{th})^3}, \quad (5)$$

missä ε^{th} on lineaarinen lämpölaajenemisvenymä. Se on määritelty isotrooppisesta lämpölaajenemiskertoimesta ja lämpötilasta. (Abaqus analysis user's guide 22.5.1.)

2.6.3 Laskentamenetelmä

Epälineaaristen yhtälöiden ratkaisemisessa käytetään eniten Newton-Raphsonin ratkaisualgoritmia. Sen hyväpuoli on suuri suppenemisnopeus, mutta toisaalta solmumäärän

kasvaessa suureksi (yli 1000) Jacobin matriisin numeerinen ratkaiseminen vaatii paljon aikaa ja on epäkäytännöllistä. Kumit ovat lineaarisesti lämpötilasta riippuvaisia ja tämän takia ratkaisualgoritmin kaavan yhtälöryhmä on suhteellisen vähän epälineaarinen. (Han ym. 1996, 63–64.)

Abaquksessa luodut elementtimenetelmä mallit ovat yleensä epälineaarisia ja saattavat sisältää jopa tuhansia muuttujia. Abaqus/Standard käyttää useimmiten numeerista Newtonin menetelmää ratkaistaessa epälineaarisia tasapainoyhtälöitä. Sen suosio johtuu suuresta suppenemisnopeudesta verrattuna vaihtoehtoihin ratkaisualgoritmeihin. Newtonin menetelmää ei haluta käyttää suurilla elementeillä, koska Jacobin matriisi joudutaan luomaan sekä ratkaisemaan joka iteraatio kierroksella uudestaan ja matriisin muodostaminen on vaikeaa. Käytetyin vaihtoehto Newtonin menetelmän sijasta on mukautettu Newtonin menetelmä, joka laskee Jacobin matriisin vain ajoittain tai ei ollenkaan. Newtonin menetelmässä diskretisoimalla tehollisen työn tasapainoyhtälö muuttujille saadaan yhtälö (6)

$$F^N(u^M) = 0. \quad (6)$$

Siinä F^N on voimakomponentti, joka on liitetty N muuttujaan. Perusongelmana on ratkaista u^M , joka on M muuttujan arvo. Newtonin yhtälön perusmuoto on kaavan (7) mukainen

$$F^N(u_i^M + c_{i+1}^M) = 0. \quad (7)$$

Iteraatio kierroksen i jälkeen u_i^M :stä saadaan likimääräinen tulos. Tämän tuloksen ja kaavasta yksi saadun ratkaisun eroa merkitään c_{i+1}^M :llä. u_i^M :stä saadaan likimääräinen tulos laajentamalla kaavan seitsemän vasenpuoli Taylorin sarjalla. Tällöin saadaan kaava (8)

$$F^N(u_i^M) + \frac{dF^N}{dU^P}(u_i^M)c_{i+1}^P + \frac{d^2F^N}{dU^P dU^Q}(u_i^M)c_{i+1}^P c_{i+1}^Q \dots = 0. \quad (8)$$

Kun u_i^M on lähin likiarvo tuloksesta, jokaisen seuraavan iteraation c_{i+1}^M suuruus on pieni. Antamalla kaavoille lineaarinen yhtälöryhmä tarvitsee huomioida ainoastaan kaavan 8 kaksi ensimmäistä termiä. Tästä muodostetaan kaava (9)

$$\frac{dF^N(u_i^M)}{dU^P} = -F^N(u_i^M), \quad (9)$$

jossa $dF^N(u_i^M)/dU^P$ on Jacobin matriisi. Seuraavan iteraatio kierroksen likimääräinen tulos saadaan kaavalla (10)

$$u_{i+1}^M = u_i^M + c_{i+1}^M. \quad (10)$$

Iteraatio jatkuu eteenpäin samalla idealla, kunnes c_{i+1}^M tulos on supennut riittävän pieneksi. (Abaqus theory guide 2.2.1.)

3 RENGASAIHION FEM-MALLINNUS

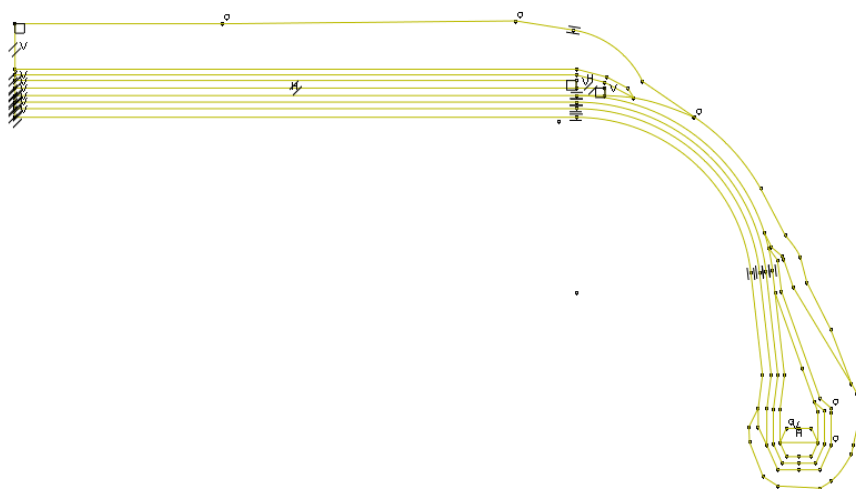
Geometriaa mallinnettiin pääosin Abaquksen puolella, jolloin voitiin minimoida 2D-mallien siirtelyä eri ohjelmistojen välillä. Ainoastaan muottien ääriviivat jouduttiin tuomaan Creo 2.0 suunnitteluohjelmiston kautta. Alla on kerrottu yksityiskohtaisesti FEM-mallinnus aina 2D-mallista analyysiin asti. Samaa mallinnustekniikkaa käytettiin jokaiselle rengasaihiole. Lisäksi kokoluokan 225/40 R18 ahiosta mallinnettiin koko poikkileikkaus ja yhteen analyysiin lisättiin paistotyyny.

3.1 2D-mallin luominen

2D-malli tehtiin renkaanaihion puolikkaan poikkileikkauksesta. Aluksi selvitettiin renkaan mitat. Teräsvöiden, JLB:n ja runkokoordien mitat otettiin suoraan rakennepiirroksista, koska niiden muodonmuutos ei ole niin merkittävä kokoonpanossa. Sivupinnan, jalka-alueen, innerlinerin, kolmioliuskan ja kaapelin profiilienmuodot selvitettiin ennen muodonmuutosta. Pinnanalueella ei käytetty kuviointia, jonka vuoksi pinnan alkuosan profiili projisoitiin rakennepiirustuksen mittojen avulla tasaiseksi. Innerliner laitettiin tasavahvaksi sen keskimääräisen paksuuden mukaan. Muut komponentit mallinnettiin tarkasti niiden profiilien mukaisesti.

Ensin mallinnettiin kaapeli, jonka päälle sovitettiin kolmioliuska. Kaapelin alareunan Y-koordinaatin sijainti saatiin laskemalla kaapelinkehämitasta säde. Kaapelikolmioliuska yhdistelmän päälle mallinnettiin runkokoordikerrokset ja Innerliner. Tämän jälkeen mallinnettiin aihion pinnan alkuosan profiili. Sen tarkka sijainti saatiin vyörummun säteenmitasta, joka pysyy vakiona renkaan ahiota kootessa. Mitta asetettiin ensimmäisen teräsvyön alareunasta. Pinta pysyi paikallaan ja kaapelia voitiin liikuttaa vapaasti X-akselin suuntaisesti, jolloin saatiin määritettyä runkokoordien pituudet. Alimmaisen runkokoordin päälle mallinnettiin Innerliner, sen pituuden mukaan. Innerlinerin loppuosan päältä aloitettiin jalka-alueen mallinnus, jonka jälkeen mallinnettiin sivupinta. Rakenteesta riippuen sivupinta laitettiin pinnanpäälle (SOT-rakenne) tai päinvastoin (TOS-rakenne). Lisäksi TOS-rakenteessa sivupinta laitettiin kulkemaan ensimmäisen teräsvyön alle. Sivupinnan tai pinnan loppuosan mallinnus järjestys riippui siis rakenteesta. Sivupinnanpro-

fiili ja pinnan loppuosan profiili mallinnettiin niiden valmistuksissa käytettävien suurautojen profiilien mukaisesti ja mallinnus aihioon tehtiin Excelin avulla. Excelissä laskettiin sivupinnan ja pinnan paksuuksien muutokset aihion profiilin muotojen muuttuessa. Lopuksi geometriaa hieman yksinkertaistettiin esimerkiksi suoristamalla sivupinnan teräviä kohtia, joita ei todellisuudessa esiinny. Pinta-ala kuitenkin pyrittiin pitämään samana. Kuvassa 12 näkyy valmis 2D-malli.

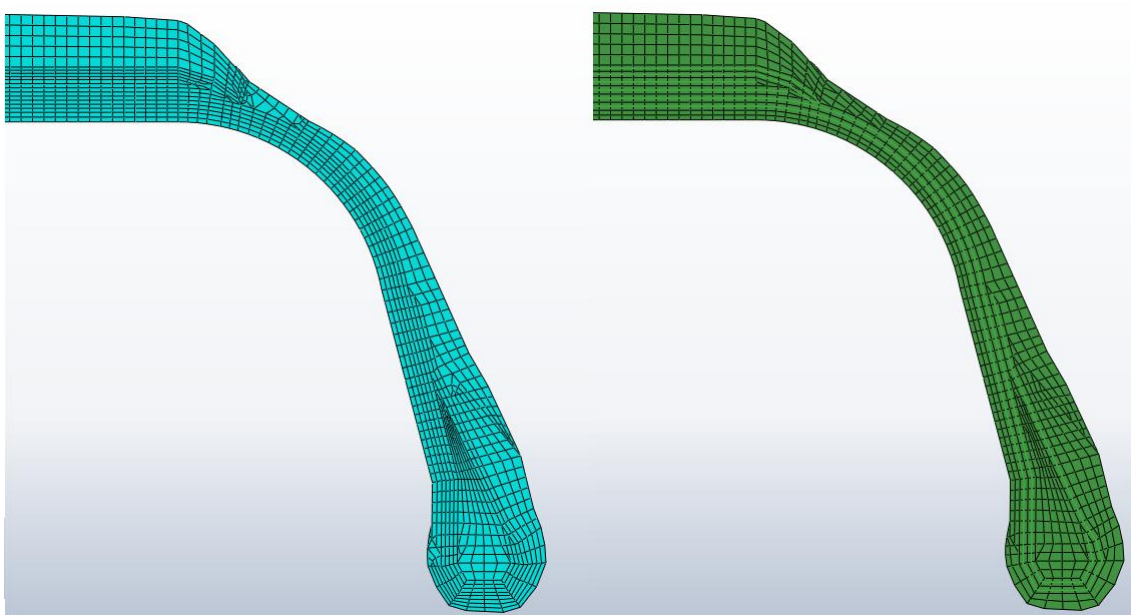


KUVA 12. kokoluokan 225/45 R18 ahiomalli ilman mittoja

Aihion kokoonpanossa sivupinta taivutetaan kaapelin yli renkaan runkoa vasten, mistä kumiin aiheutuu pieniä kuroumia (negatiivisia venymiä). Yhteen malliin laskettiin kuroumat alkuperäiseen mittaan verrattuna (Lagrangen venymä), runkorummun säteen, aihion profiilin säteiden ja sivupinnan paksuuksien avulla. Siitä saatuja tuloksia verrattiin ilman kuroumia laskettuun malliin. Todettiin, että kuroumat olivat pieniä ja toleranssirajoissa. Myöskään laskentatuloksissa ei ollut suurta poikkeamaa. Tämän perusteella sivupinnat voitiin mallintaa suoraan suurautojen profiilien perusteella, jolloin mallinnuksesta tuli paljon nopeampaa ja yksinkertaisempaa.

3.2 Verkotus

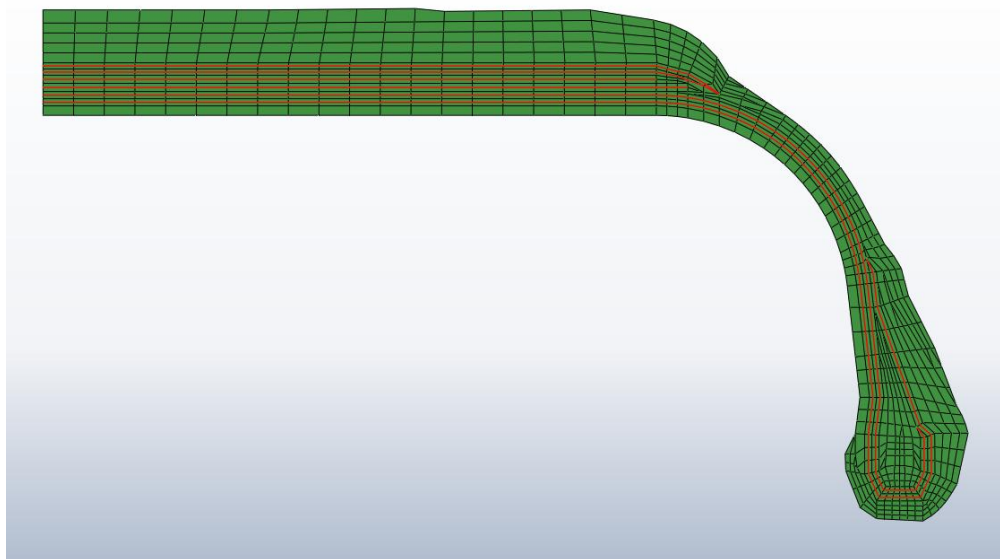
FEM- puolella 2D-mallista tehtiin pyörähdyssymmetrinen kappale, jolle määritettiin materiaalirajat. Tämän jälkeen aloitettiin verkotus. Aihio verkotettiin käyttämällä aksisymmetrisiä kolmio ja neliö solidielementtejä (CGAX3 ja CGAX4R). Oltiin kiinnostuneita erityisesti kumien paksuuksien muuttumisesta aihiossa, jolloin näitä elementtejä oli järkevää hyödyntää. Renkaanaihion geometria on sen verran monimutkainen, että automaattisella verkotuksella ei saatu optimaalista elementtiverkkoa. Verkotus tehtiin siis manuaalisesti. Verkkoa ei voitu muokata aivan vapaasti, koska materiaalirajojen täytyi pysyä alkuperäisinä. Verkon tiheydellä ja elementtien muodoilla oli suuri merkitys laskenta-aikaan ja tuloksiin, jonka vuoksi elementtiverkon luomiseen panostettiin. Ongelmakohtia olivat muun muassa suppenevat rajapinnat, jonne automaatti verkotus teki liian tiheää verkkoa tai paljon kolmioelementtejä. Verkkoa harvennettiin manuaalisesti ja koitettiin minimoida kolmioelementtien lukumäärää, koska kolmioelementit ovat niin jäykkiä neliöelementteihin verrattuna. Kolmioelementit saattavat aiheuttaa täten laskennallisia virheitä. Kuvassa 13 näkyy ero automaattisesti ja manuaalisesti tehtyjen verkkojen välillä.



KUVA 13. Sinisellä on automaattisesti luotu verkko ja vihreällä on manuaalisesti paranneltu verkko

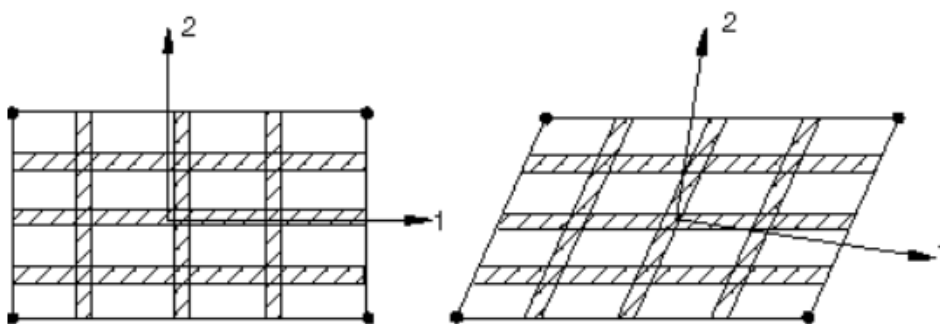
3.3 Vahvikekuidut

Verkotuksen jälkeen vahvikekuidut määritettiin rebar-elementeillä (SFMGAX1) (kuva 14). Niitä käytetään yksiakselisen vahvikekerroksen määrittämiseen kuori-, pinta- ja kalvoelementeillä (Abaqus Analysis User's Guide 2.2.3).



KUVA 14. Punaisella näkyvät viivat ovat vahvikekuituja

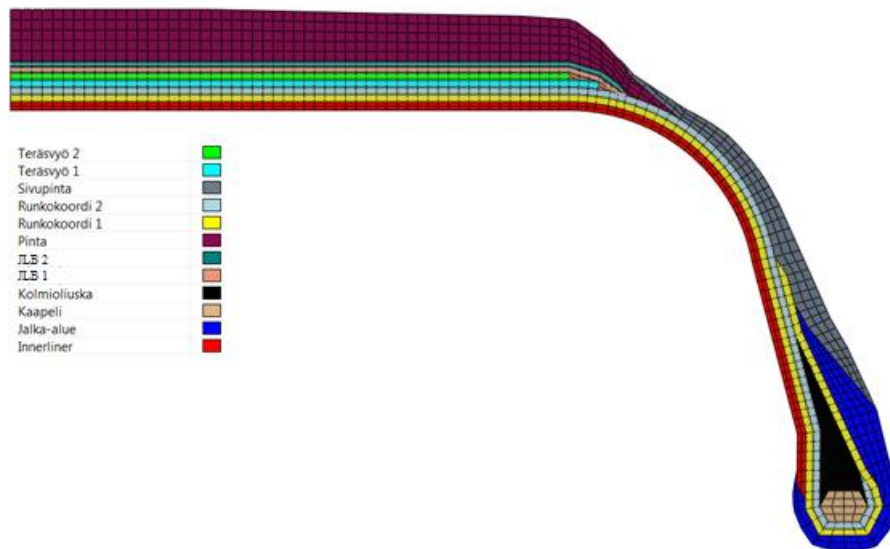
Rebar-elementit esitetään pintaelementteinä joilla ei ole paksuutta. Tämän vuoksi ne eivät pysty siirtämään leikkausjännitystä tasossa ja niillä ei ole taivutusjäykkyyttä. Rebar-elementit voidaan upottaa solidielementteihin, jolloin ne jäykistävät rakennetta (Abaqus Analysis User's Guide 32.7.1) Vahvikekuidut olisi voitu mallintaa myös käyttämällä komposiittikuorimallia, mutta Ochoan ja Reddyn mukaan komposiittikuorimalli on lineaarinen (1992, 24). Koska renkaassa esiintyy taas paljon epälineaarisuutta, rebar-elementit toimivat paremmin kuin komposiittikuorimalli. Kuvassa 15 näkyy rebar-elementtien suunnan muuttuminen elementtitasossa epälineaarisessa analyysissä.



KUVA 15. Rebar-elementtien suunnanmuuttuminen elementtitasossa (Abaqus Analysis User's Guide 2.2.3–7).

3.4 Materiaali

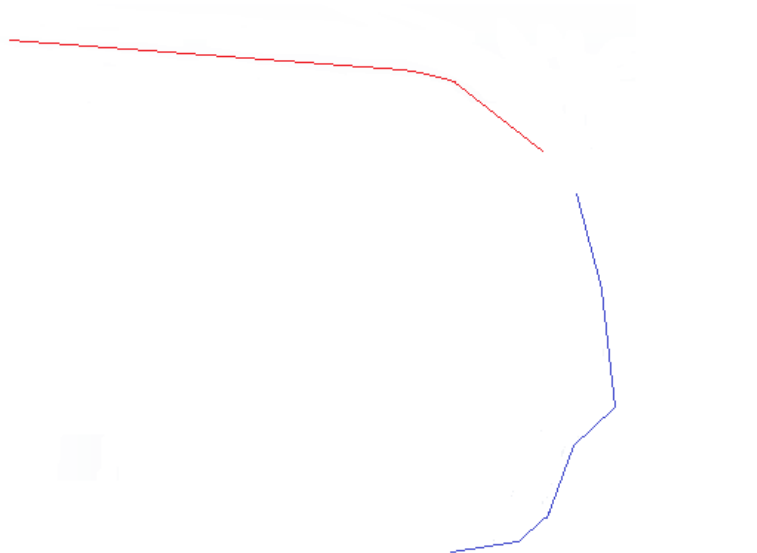
Seuraavaksi elementeille määriteltiin materiaalit niiden materiaalirajojen mukaisesti (kuva 16). Kumien materiaali ominaisuudet määritettiin Abaquksen neo-Hookeen materiaalimallia (2.5.2) käyttäen. C10 ja D1 arvot määriteltiin kokeellisesti laboratoriosta saatujen reometrikäyrien ja vetokokeiden avulla. Teräsvöiden, koordien ja JLB:n materiaaliominaisuudet eivät juurikaan muutu paistonaikana, jolloin niille voitiin käyttää valmiin renkaan materiaaliominaisuuksia. Nämä materiaaliarvot oli saatu aiemmista laboratoriotesteistä, muun muassa vetokokeen avulla. Abaquksella määritettiin myös rebarien kulmat. Ne vaihtelevat hieman renkaasta riippuen. Teräsvyöt asetettiin $25\text{--}30^\circ$ kulmaan ja runkokoordit $80\text{--}90^\circ$ kulmaan aihion kehäsuuntaan nähden. Lisäksi JLB:lle asetettiin tietty päällekkäisyys prosentti. Eli käytännössä polyamidilangat ovat kiinnitetty toisiinsa kumilla ja niistä on tehty nauhoja, joissa jokaisessa on useita lankoja. Nämä nauhat ovat laitettu kulkemaan osittain toistensa päälle, päällekkäisyysprosentista riippuen.



KUVA 16. Materiaalimäärittelyt

3.5 Muotti

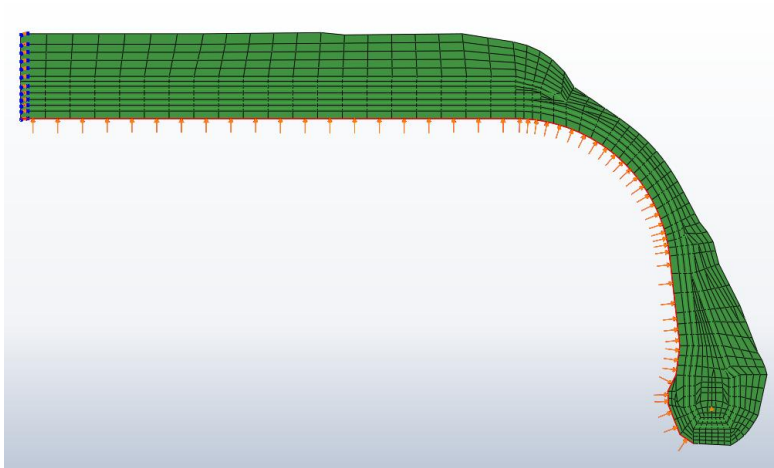
Materiaalimäärittysten jälkeen tehtiin muotin puolikkaan poikkileikkauksen ääriviivat (kuva 17), jota vasten rengasaihio lopulta muokkautuu. Eri renkaiden muotit saatiin poistamalla valmiiden renkaiden rakennepiirroksista kaikki muut paitsi renkaan ulkopinnan ääriviivat. Muotti jaettiin pinnan puolikkaaksi ja sivupinnaksi. Nämä määriteltiin jäykiksi pinnoiksi, jolloin niissä ei tapahdu muodonmuutosta. Muotin tarkka sijainti saatiin määritettyä rakennepiirroksessa ilmoitetun renkaan säteen avulla.



KUVA 17. Sinisellä viivalla on merkattu muotin sivupinta ja punaisella päälipinta

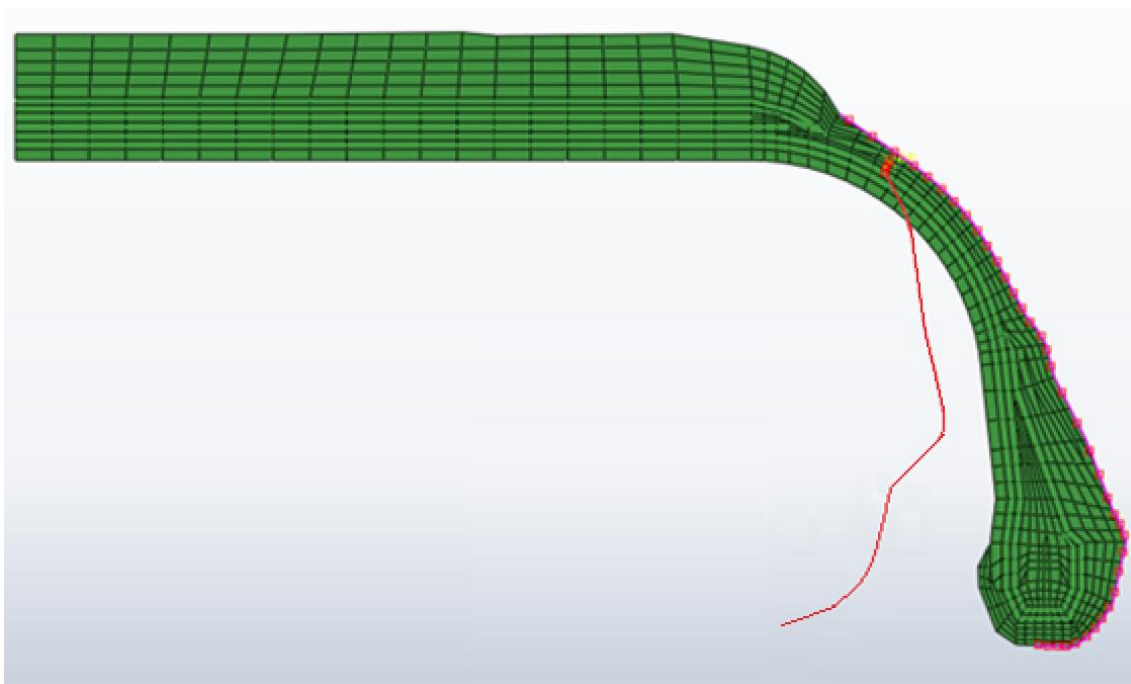
3.6 Reunaehdot

Materiaalimäärittysten jälkeen rengasaihiolle tehtiin kolme eri pintaa (sisäpinta, ulkopinnalle ja jalka- ja sivupinnanalue). Sisäpinnalla voitiin määrittää mille alueelle paine kohdistuu ja muilla pinnoilla mitä pintaa vasten muotti kiinnittyy. Kaapeli alueelta valittiin yksi solmu, jonka säteen suunta sidottiin. Symmetriatasosta valittiin taas kaikki solmut ja niille asetettiin symmetriaehto. Näillä solmujen kiinnityksillä saatiin pidettyä rengasaihio oikeassa asemassa (kuva 18).



KUVA 18. Paineen ja tuentojen määrittäminen

Tämän jälkeen rengasaihio ja muotti tuotiin kokoonpanon puolelle, jossa pintojen välille määritettiin kontaktit. Jäykät pinnat (muotti) valittiin pääpinnoiksi ja muokkautuvat pinnat (rengasaihio) orjapinnoiksi. Muotin sivupinta ja rengasaihion sivupinta muodostivat yhden kontaktiparin, muotin pinta ja rengasaihion pinta taas toisen kontaktiparin (kuva 19). Pintojen välille sallittiin äärellinen liukuma, joka mahdollistaa mielivaltaisen liikkeen pinnoilla. Lisäksi määritettiin kitkakertoimeksi muotin sivupinnalle 0.2 ja pinnalle 0.3, koska todellisuudessa aihion liikkuess muottia vasten muodostuu kitkaa. Pintaan asetettiin suurempi kitkakerroin oikeassa muotissa olevan pintakuvioinnin muotolukittumien huomioimisen takia.

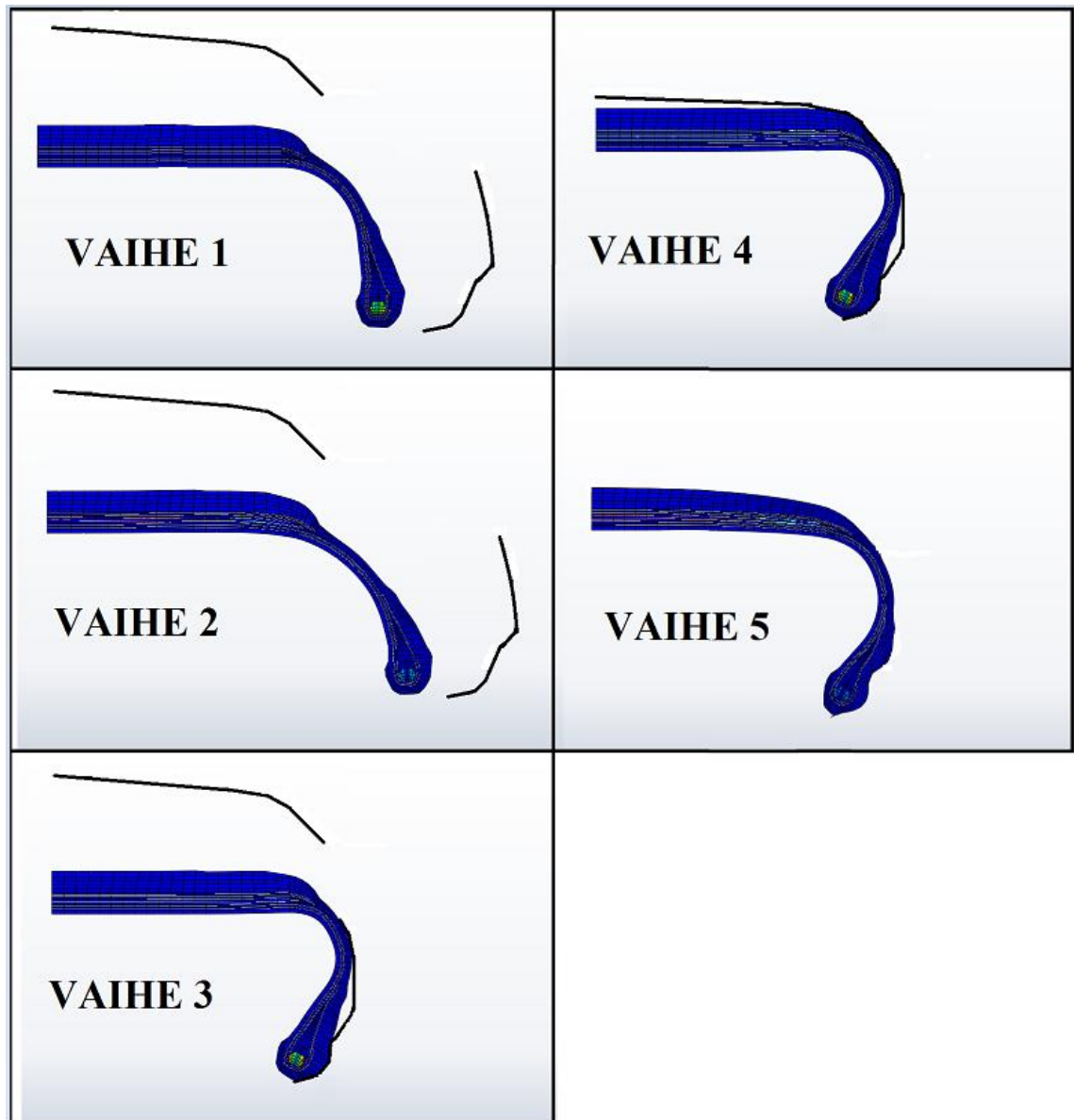


KUVA 19. Vasemmalla kontaktipari sivupintojen välillä

3.7 Analyysi

Varsinainen analyysi sisälsi viisi vaihetta, jotka seurasivat varsinaista paistotapahtumaa. Aihioista riippuen sen sisäpintaan kohdistuvilla paineilla oli pieniä eroavaisuuksia. Ensimmäisessä vaiheessa muotti siirrettiin pois rengasaihiosta, jotta se ei ollut kontaktissa siihen. Seuraavaksi aihion sisäpintaan muodostettiin esipaine (noin puoli baaria). Sitten muotin sivupinta siirrettiin renkaan aihion sisäpintaa vasten ja samalla esipaine vaihdettiin venytyspaineeksi (noin baari). Tämän jälkeen muotin pinta kiinnittyi rengasaihioon

ja muotin sivupintaan, jolloin muotti sulkeutui. Lopuksi rengasaihion sisäpintaan kohdistettiin varsinainen paine (toista kymmentä baaria) johon analyysi päättyi. Kuvassa 20 näkyy kaikki vaiheet yhdestä analyysistä.

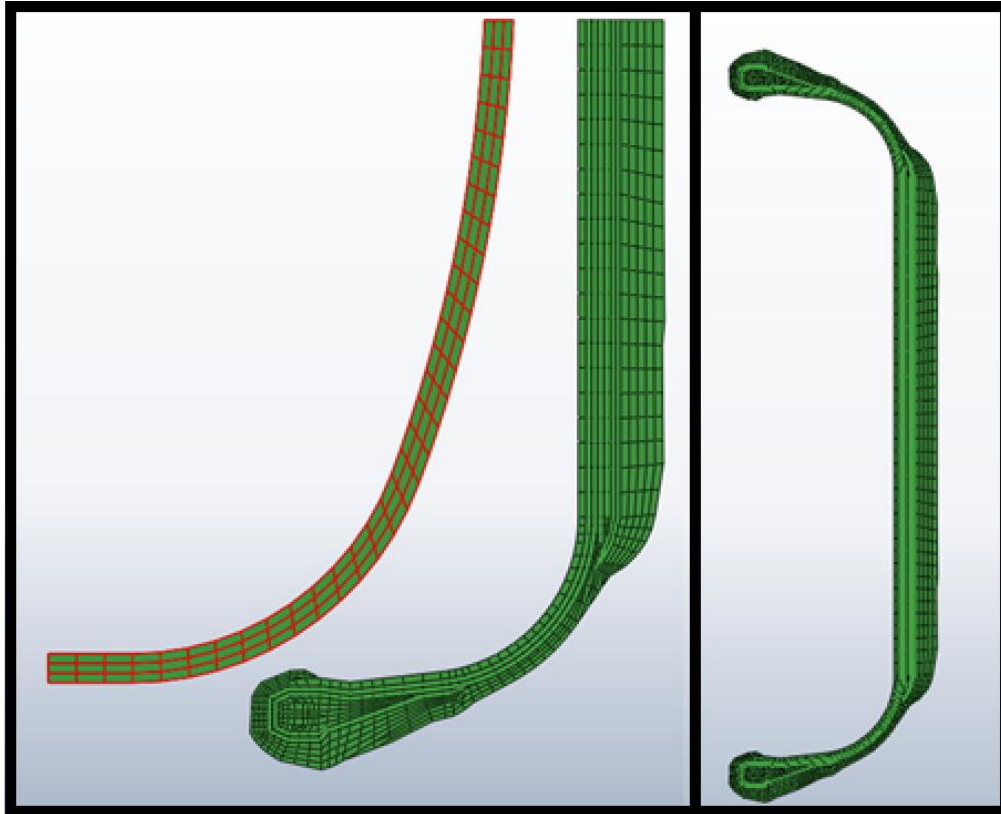


KUVA 20. Analyysi vaiheittain, mustat viivat ovat muotin ääri viivoja

3.8 Analyysi paistotyynyllä ja poikkileikatulla rengasaihiolla

Analyysit paistotyynyn ja poikkileikatun rengasaihion kanssa tehtiin vastaavasti kuin puolikkaalle poikkileikatulle rengasaihiolle. Tällä haluttiin testata, onko paistotyynyn huomioon ottamiselle tai kokorengasaihion poikkileikkauksella vaikutusta tuloksiin.

Paistotyynyn materiaaliominaisuudet saatiin laboratoriosta ja sen muodot mallinnettiin rakennekuvan mukaisesti. Poikkileikattu rengasaihio peilattiin puolikkaasta rengasaihioista ja muuten sille käytettiin yllämainittuja määrittämiä. Kuvassa 21 vasemmalla näkyy paistotyynyllä ja oikealla koko poikkileikkauksella mallinnettu 2D-malli. Paistotyyny on merkattu punaisilla viivoilla.



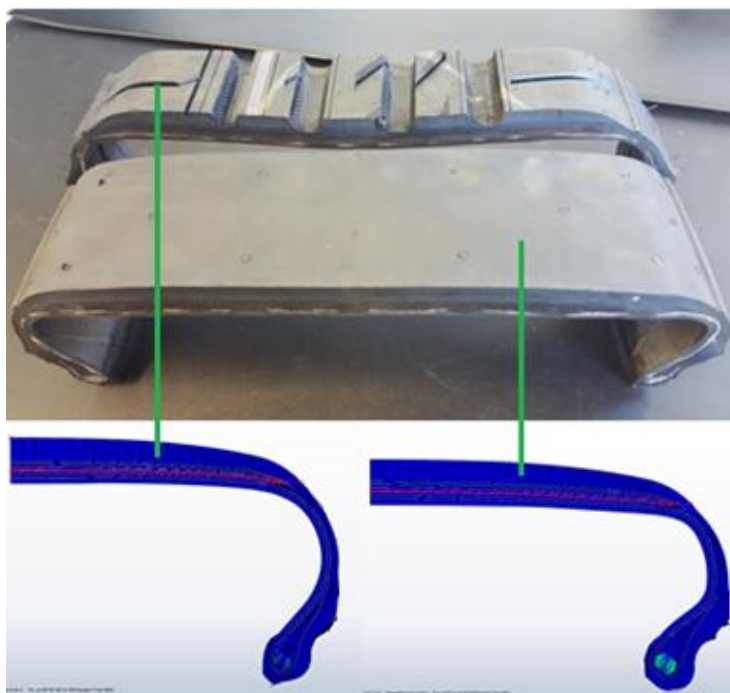
KUVA 21. Paistotyyny ja koko poikkileikkaus 2D-mallit

4 FEM-MALLIN VERIFIOINTI

Verifiointi on tärkeää, jotta voidaan todeta, että malli vastaa riittävän hyvin todellisuutta. Paistokokeella selvitettiin miten muotti alkaa painautumaan rengasaihiota vasten, sileällä renkaalla tutkittiin teräsvöiden kapenemista ja painekalvotestillä katsottiin miten paine jakautuu rengasaihion sivupintaan paistossa.

4.1 Teräsvyöt

FEM-mallissa pinta mallinnettiin sileänä ilman pintakuviointia. Abaquksessa tehdyssä FEM-mallissa, teräsvyöt kapenivat merkittävästi verrattuna oikeaan kuviolliseen renkaaseen. Haluttiin selvittää kapeneeko sileän renkaan vyöt oikeasti enemmän kuin kuviollisen ja onko FEM-malli tämän perusteella luotettava. Koe tehtiin 235/35 R19 sileän renkaan ja kuviollisen renkaan välillä (kuva 22). Molemmat renkaat halkaistiin ja niistä mitattiin teräsvöiden pituudet. Sitten Abaquksella mallinnettiin aiemmin mainitulla tyylillä kyseinen sileä rengas. Analyysin ollessa valmis mallista mitattiin teräsvöiden pituudet, kuviollisesta renkaasta mitat oli saatu jo aiemmin. Seuraavaksi oikeista renkaista saatuja mitattuja tuloksia verrattiin FEM-malleista saatuihin tuloksiin.



KUVA 22. Halkaistut renkaat ja FEM-mallit

4.2 Paistokoe

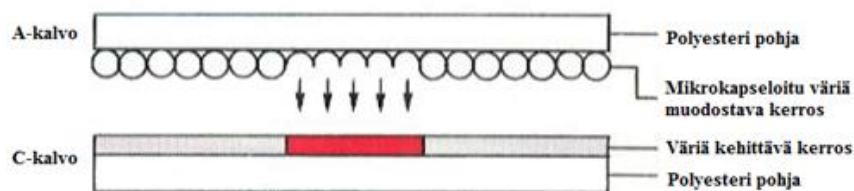
Paistokokeen avulla haluttiin varmentaa, miten muotti alkaa painautua rengasaihiota vasten. Käytännössä kokoluokan 225/40 R18 rengasaihioita pidettiin eri aika paistossa ja katsottiin mitä rengasaihiolle tapahtuu. Ensimmäinen aihio kävi nopeasti paistossa ja ei saavutettu paistopainetta. Toinen rengasaihio oli paistopaineessa 5 sekuntia, kolmas 15 sekuntia ja viimeinen rengasaihio paistettiin loppuun asti, jolloin muotti myös puhdistui. Kuvassa 23 näkyy käytetty rengasaihio.



KUVA 23. Rengasaihio

4.3 Paineekalvotesti

Testissä käytettiin Fujifilmin valmistamaa kahdesta eri arkista muodostuvaa paineekalvoa. Kalvo A on päällystetty mikropainekapseleilla, jotka hajoavat tietyssä paineessa. Kalvo C imee kapselista tulleen aineen ja muodostaa väriä paineesta riippuen (kuva 24). (Fujifilm.)



KUVA 24. Paineekalvojen toimintaperiaate (Fujifilm, muokattu)

Painekalvoilla haluttiin testata miten paine jakautuu rengasaihion sivupintaan muotin painautuessa sitä vasten. Käytössä oli kahta erilaista kalvoa LW (low pressure range) ja LWW (super low pressure range) (kuva 25). Näistä LWW sopi paremmin tutkittavalle painealueelle ja sen tulokset olivat täten tarkemmat.



KUVA 25. Etummainen kalvo on väriä imevä ja takimmainen väriä muodostava kalvo

Testissä käytettiin kahta rengasaihiota, jotka olivat eriajan paistossa. Molempiin rengasaihioihin kiinnitettiin kaksi kappaletta LW ja LWW kalvoja, molemmille sivupinnoille noin 90 asteen välein. A ja C-kalvot laitettiin varovasti toisiaan vasten ja kiinnitettiin rengasaihioon hyvin ohuiden kumien avulla (kuva 26). Ensimmäinen rengasaihio käytettiin paistopaineessa ja sitten päästettiin välittömästi paineet pois. Toinen rengasaihio oli paistopaineessa 15 sekuntia.



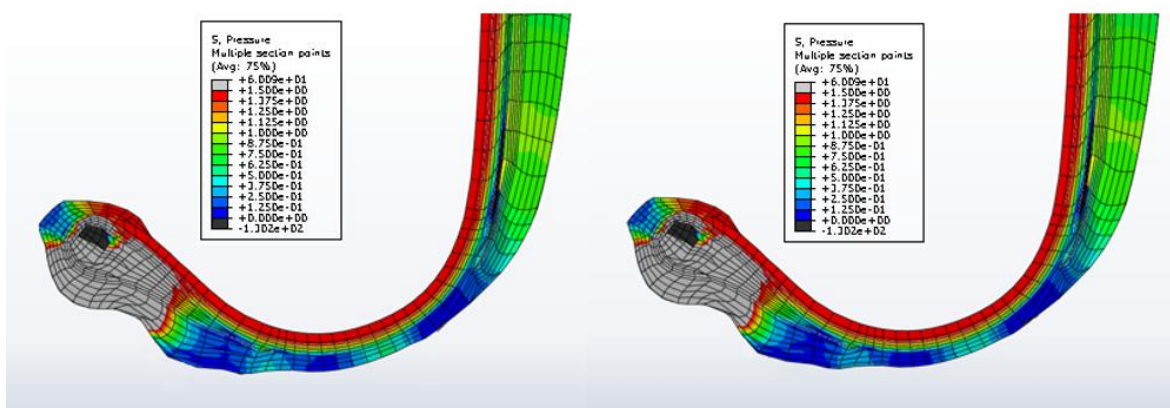
KUVA 26. Kalvojen kiinnitys

5 TULOKSET

Tuloksissa esitellään ensin kuroumien, sitten paistotyynyn ja koko rengasaihion vaikutukset tuloksiin. Tämän jälkeen käydään läpi FEM-mallin verifioinnista saadut tulokset ja kerrotaan eroavaisuuksista eri rengasaihioden analyysien välillä. Rengasaihioden tuloksissa keskityttiin erityisesti painejakaumaan. Kuvissa esiintyvät paineet ovat ilmoitettu MPa:na.

5.1 Analyysi kuroumilla

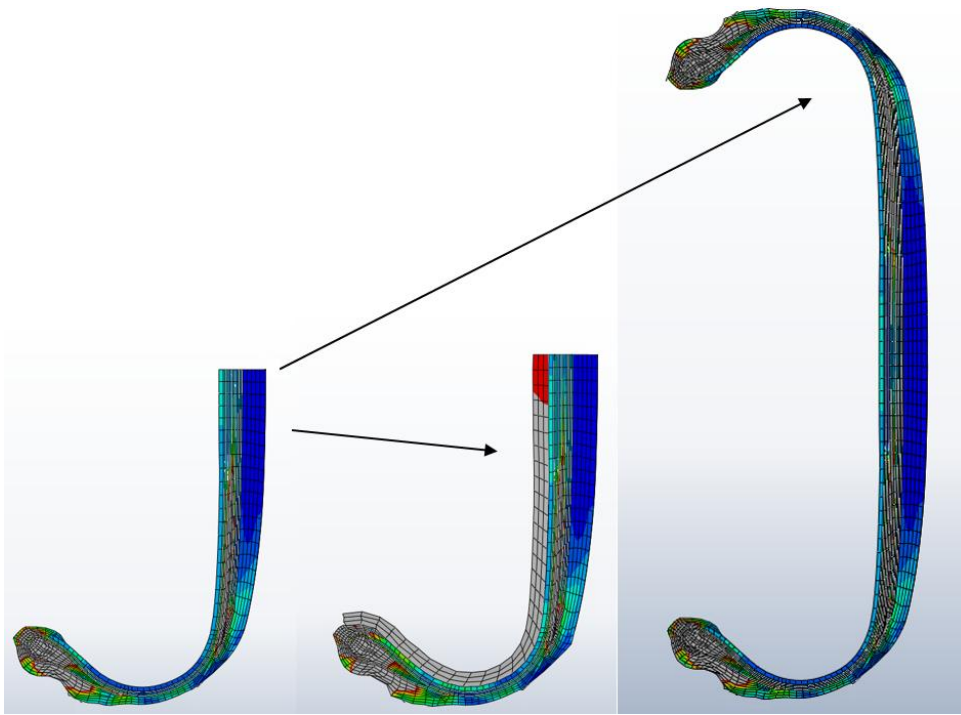
Laskettiin rengasaihion 2D-mallin kuroumat alkuperäiseen mittaan verrattuna (Lagran- gen venymä) ja tuloksia verrattiin ilman kuroumia laskettuun malliin. Todettiin, että kuroumat olivat pieniä ja tuotannon toleranssirajoissa. Myöskään laskentatuloksissa ei ollut suurta poikkeamaa. Kuvassa 27 on verrattu painejakauman muutosta kuroumilla ja ilman kuroumia olevien 2D-mallien välillä analyysin ollessa valmis. Niiden välillä ei ole merkittävää eroa.



KUVA 27. Oikeanpuoleisessa kuvassa huomioitu kuroumat

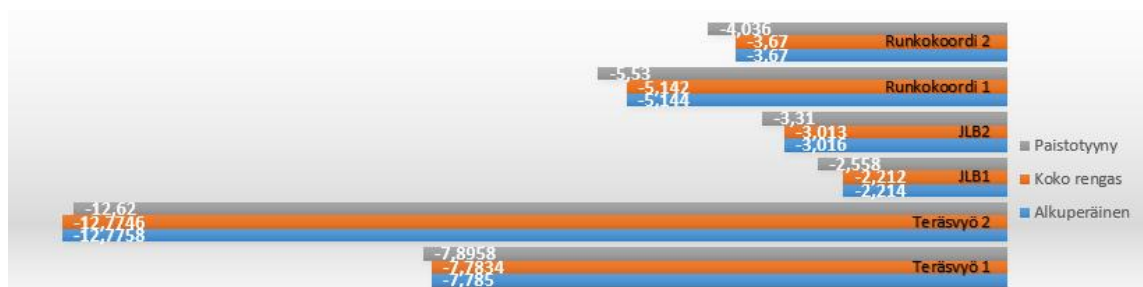
5.2 Paistotyyny ja koko rengasaihio

Tutkittiin miten paistotyynyn ja renkaan koko poikkileikkauksen analyysit vaikuttavat tuloksiin. Rengasaihiona käytetään kokoluokkaa 225/40 R18. Kuvassa 28 näkyy vasemmalla puolikas ja keskellä 2D-malli paistotyynyllä sekä oikealla kokonainen 2D-poikkileikkausmalli.



KUVA 28. Analyysit

Kuviossa 1 on vertailtu analyysin aikana syntyneitä kutistumia. Tulokset ovat ilmoitettu millimetreissä ja poikkeamaa on verrattu rakennekuvassa annettuihin mittoihin. Paistotyynyn kanssa tehty malli poikkeaa eniten muista tuloksista, koska analyysiä ei pystynyt laskemaan aivan loppuun asti. Tulosten kannalta ei siis ole merkitystä mitä näistä malleista käyttää.



KUVIO 1. Kutistumat analyysissä

5.3 Verifiointi

Tässä esitellään verifiointista saadut tulokset. Ensin käydään läpi, mitä teräsvöille käy, sitten tutkitaan paistokoetta ja lopuksi katsotaan painekalvotestaukset. Näiden tulosten perusteella selviää kuinka hyvin FEM-malli vastaa todellisuutta.

5.3.1 Teräsvyöt

Taulukossa 1 näkyy vertailu teräsvöiden kapenemisesta FEM-mallin ja oikeiden renkaiden välillä. Teräsvöiden kaventumaa on verrattu rakennepiirroksessa annettuihin mittoihin. Huomataan, että sileälle renkaalle saadut tulokset oikean renkaan ja FEM-mallin välillä ovat hyvin lähellä toisiaan ja kuviollisella renkaalla poikkeama on taas huomattavasti suurempi. Lisäksi sileässä renkaassa teräsvyöt kapenevat huomattavasti enemmän kuin kuviollisessa renkaassa. Tämän tuloksen perusteella voidaan todeta, että teräsvöiden kapeneminen on suurempaa sileällä kuin kuviollisella renkaalla ja FEM:llä tehtyjä malleja voidaan pitää luotettavana.

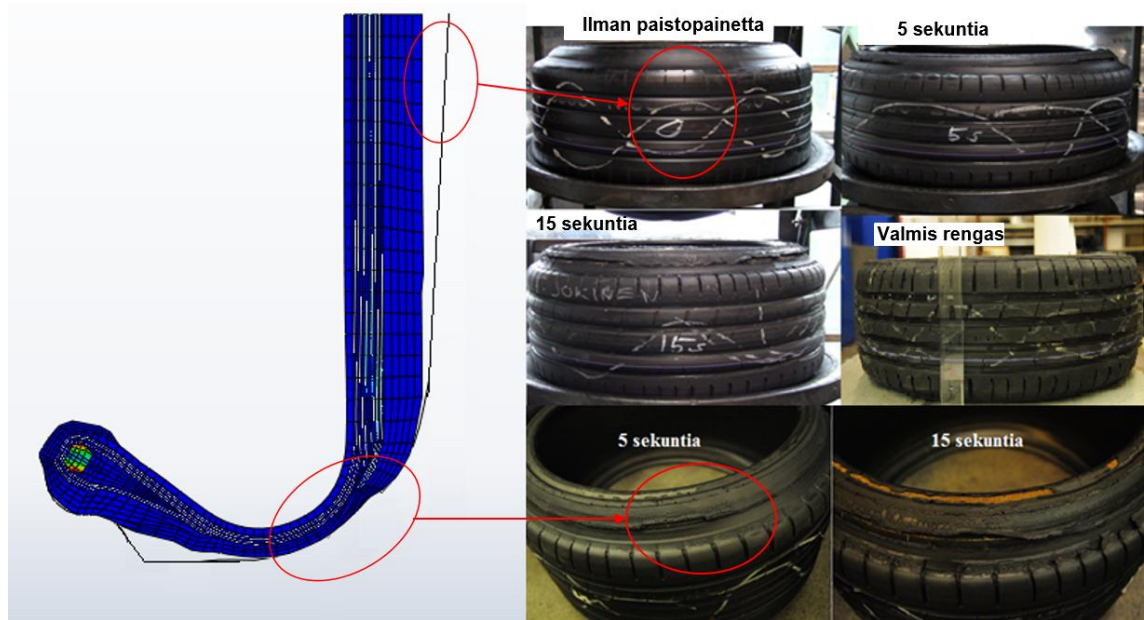
TAULUKKO 1. Teräsvöiden kaventuminen

Sileä rengas	Teräsvyö	Teräsvyön Kaventuma (mm)
FEM malli	1	9,546
Rengas	1	12
FEM malli	2	12,4724
Rengas	2	14
Kuviollinen rengas		
FEM malli	1	7,785
Rengas	1	1
FEM malli	2	12,7758
Rengas	2	4

5.3.2 Paistokoe

Paistokokeessa 5 ja 15 sekuntia paistopaineessa olleiden rengasaihioden avulla nähtiin parhaiten, että ensimmäiseksi rengasaihion jalka-alue ja olkapää alkavat muokkautumaan. Tämän jälkeen renkaan pintaan alkaa vähitellen muodostua kuvioita. Vastaavasti tapahtuu myös FEM-mallin analyysissä, kontakti on ensin muotin jalka-alueella ja olka-

päällä. Sen jälkeen pintaan muodostuu kontakti. Tämän perusteella analyysi on realistinen. Kuvassa 29 on osoitettu miten rengas on ottanut kontaktia muottiin ja sitä on verrattu FEM-mallin analyysin neljänteen vaiheeseen.



KUVA 29. Paistokoe ja FEM-malli

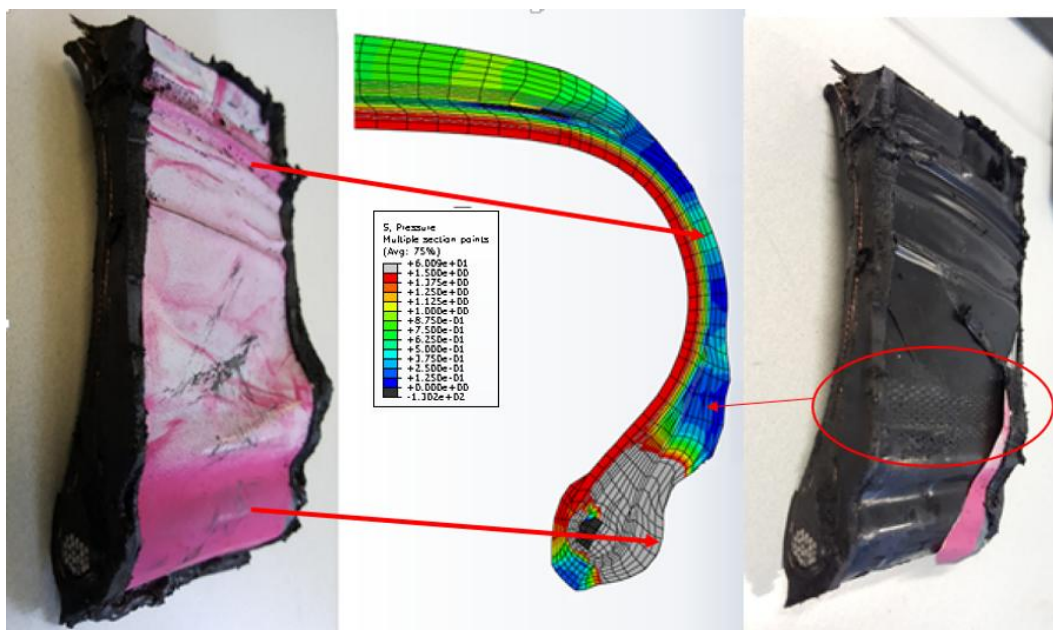
5.3.3 Paineekalvotesti

Mitä punaisempi kalvo on sitä suurempi paine kalvoon on muodostunut. Kuvassa 30 näkyy LWW-kalvolla saadut tulokset. LW-kalvoissa tulokset näkyvät paljon huonommin, jonka vuoksi niitä ei esitellä tässä työssä. Ylemmissä kuvissa on paistopaineessa käynyt ja alemmissa paistopaineessa 10 sekuntia ollut rengasaihio. Jokaisen kuvan alaosa esittää olkapää aluetta ja yläpää jalka-aluetta.



KUVA 30. Painekalvo tulokset LLW kalvolla

FEM-mallissa suurin paine muodostui jalka-alueelle ja olkapään läheisyyteen, pienin paine syntyi taas vannesuojan läheisyyteen. Vastaavasti tapahtui myös rengasaihioon kiinnitetylle paineikalvolle. Kuvassa 31 näkyy vertailu FEM-mallin ja oikean paineikalvon välillä.



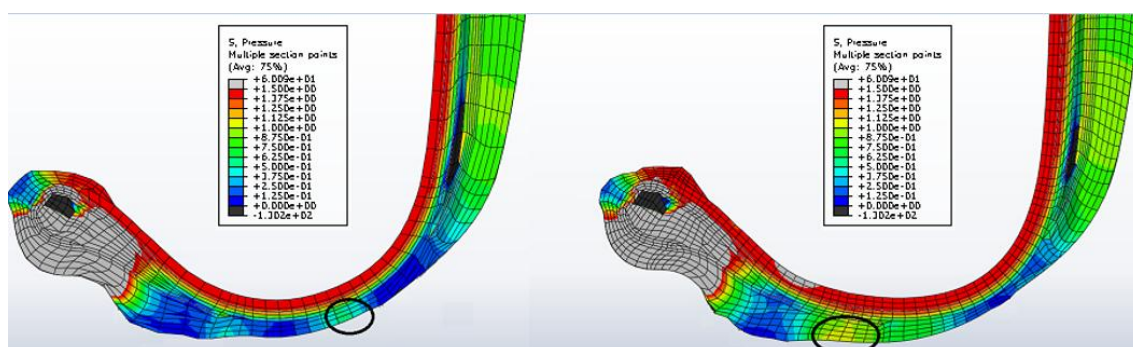
KUVA 31. Painekalvo ja FEM-malli. Punaisella ympyröidylle alueelle kohdistuu pienin paine, siinä kohtaa rengasaihion pinta ei ole muokkautunut sileäksi

5.4 Rengasaihoiden analyysien vertailu

Analyyseissä verrattiin painejakaumaa sekä kutistumia vahvikekuiduissa ja teräsvöissä. Lisäksi tutkittiin minne renkaan sivupinnan kapein kohta muodostuu ja tapahtuuko analyysin eri vaiheiden aikana jotain erikoista. Vertailussa käytettiin seitsemää rengasaihio mallia.

5.4.1 Painejakauma

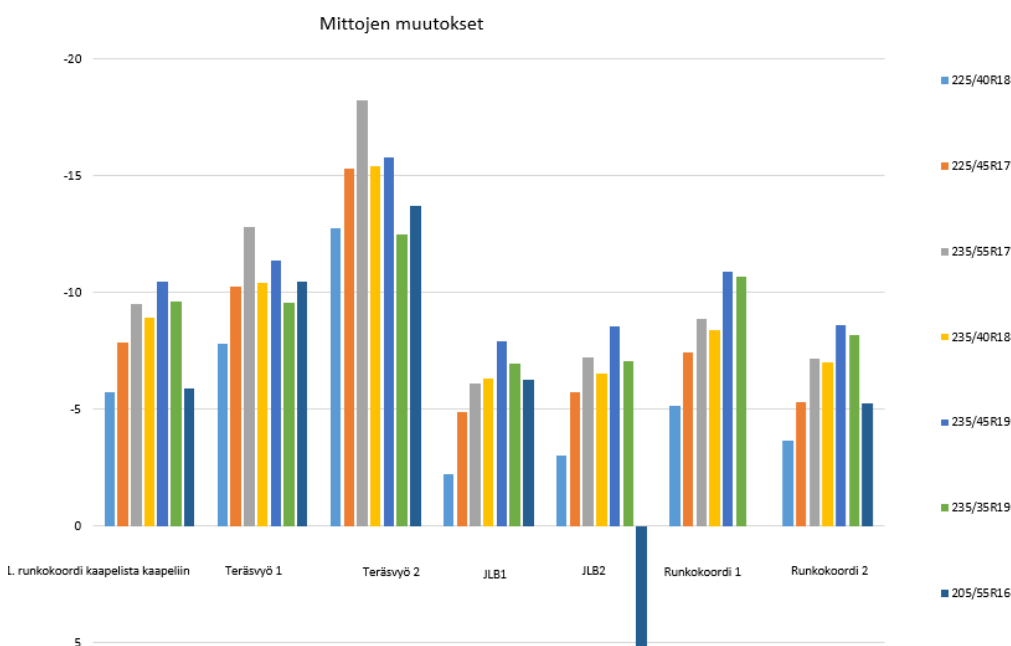
225/40 R18 renkaan käyttäytymistä verrattiin eri kokoluokkien renkaisiin. Analyysin tulosten tarkastelussa vertailtiin millaisia paineita muodostuu ja minne kohtiin rengasaihioita. Erityisesti tutkittiin mitä sivupinnan alueella tapahtuu. Huomattiin, että 225/40 R18:een muodostuu pienempi paine kuin vertailtaviin rengasaihioihin. Sivupintaa tutkiessa jokaisessa rengasaihiossa suurin paine muodostui jalka-alueelle. Toiseksi suurin paine taas vannesuojan läheisyyteen, paitsi 225/40 R18:ssa paine muodostui muottien liitoskohdan läheisyyteen. Kuvassa 32 näkyy painejakauma erot kahden rengasaihion välillä analyysin ollessa valmis. Vasemmalla on 225/40 R18 ja oikealla on 235/40 R18 rengasaihio.



KUVA 32. Painejakauma. Musta ympyrä ilmaisee minne sivupinnan suurin paine kohdistuu

5.4.2 Kutistumat

Rengasaihioista vertailtiin myös eroavaisuuksia teräsvöiden, runkokoordien ja JLB:n kutistumisissa. Niistä havaittiin, että renkaan profiilin ja pinnan leveyden kasvaessa kutistuma suurenee. 205/55 R16 renkaassa JLB 2 ei ulotu kuin olkapää alueelle, jonka takia se venyy. Kuviossa 2 näkyy mittojen muutokset millimetreissä analyysin alku- ja loppuvaiheen välillä.

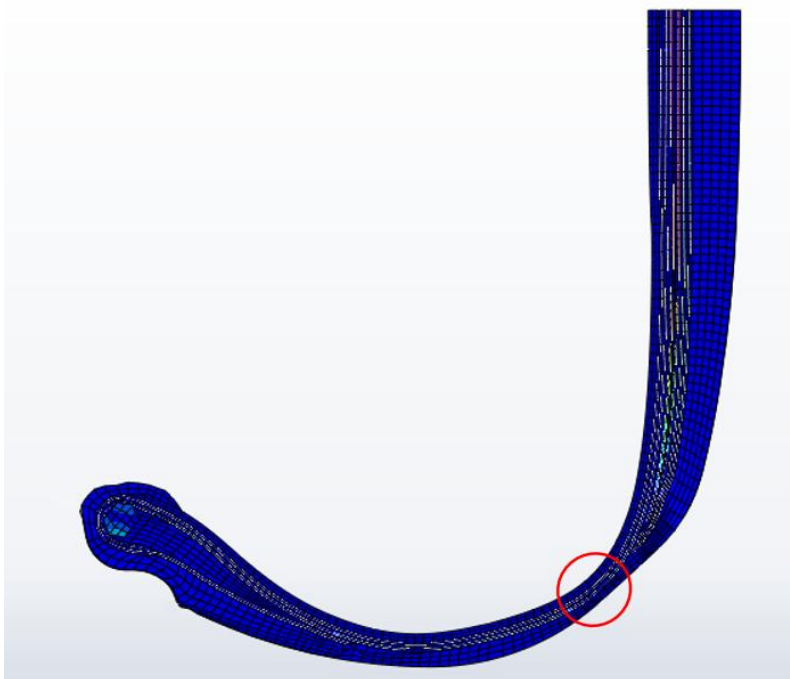


KUVIO 2. Kutistumien muutokset

Lisäksi 225/40 R18:sta tehtiin useampi malli, jossa ensimmäisen runkokoordin kaapelista kaapeliin menevää mitta muutettiin. Tällä tutkittiin miten kireyden muutos vaikuttaa teräsvöiden ja vahvikekuitujen kutistumiin. Tulosten perusteella havaittiin, että kiristämällä runkokoordia kutistumat pienenevät ja löysentämällä taas kasvavat. Liitteestä 1 löytyy tästä tehty kuvaaja. X-akselilla näkyy ensimmäisen runkokoordin kaapelista kaapeliin menevän mitan poikkeama tavoitearvosta. Y-akseli kuvastaa vahvikekuitujen ja teräsvöiden pituuksien muutoksia analyysin alku- ja loppuvaiheen välillä.

5.4.3 Kapein kohta

Tutkittiin minne kohtaan rengasaihioden sivupinnan kapein kohta muodostuu analyysin ollessa valmis. Pääosin kapein kohta muodostui muottien liitoskohdan läheisyyteen (kuva 33). 225/40 R18:ssa kapein kohta oli hieman ennen muottien liitoskohtaa, mutta eroavaisuus ei ollut merkittävän suuri, mikä on nähtävissä rengasaihiomuodosta.



KUVA 33. Kapein kohta ympyröity punaisella

5.4.4 Analyysi vaiheittain

Jokaisen rengasaihion analyysit käytiin vaihe vaiheelta läpi ja katsottiin tapahtuuko niissä jotain erikoista. Kokoluokassa 225/40 R18 huomattiin rengasaihion sivupinnan irtaavan kokonaan muotin sivupinnasta, rengasaihion pinnan kiinnittyessä muottiin. Vertailukoh-
tina olleissa rengasaihioissa sivupinta irtosi osittain tai ei juuri ollenkaan.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Tuloksia tarkasteltaessa on tärkeää huomioida niihin vaikuttavat virhetekijät. Ensin esitellään laskentaan ja sitten kokeelliseen puoleen vaikuttavia virhetekijöitä.

6.1 Laskentaan vaikuttavat tekijät

2D-mallissa virheitä aiheuttivat venymien huomiotta ottaminen ja geometrian yksinkertaistaminen. 2D-malleissa venymät olivat toleranssirajoissa ja virheet hyvin pieniä, täten niitä ei ollut järkevää huomioida. Geometriaa hieman yksinkertaistettiin, muun muassa sivupinnan terävissä kohdissa, joita ei todellisuudessa esiinny. Pinta-ala pyrittiin pitämään samana, jolloin virheet saatiin minimoitua.

Rengasaihion FEM-mallissa on monia yksinkertaistuksia, joista aiheutuu virheitä. Elementtiverkko on näistä merkittävin. Vaihtelua esiintyy muun muassa verkon tiheydessä, sekä kolmio- ja neliöelementtien lukumäärässä ja muodossa. Etenkin kolmioelementtien suurempi jäykkyys neliöelementteihin verrattuna saattaa aiheuttaa pientä virhettä. Rebar-elementeillä mallinnetut teräs- ja kuituvahvikkeet, eivät taas pysty huomioimaan taivutusjäykkyyttä. Toisaalta rebar-elementeillä virhe on pienempi kuin esimerkiksi komposiittikuorimalleilla, jotka eivät pysty huomioimaan epälineaarisuutta.

Materiaalimalli on aina yksinkertaistus todellisuudesta. Neo-Hooken materiaalimalli ei siis täysin pystynyt jäljittämään materiaalien käyttäytymistä. Kuten aiemmin todettiin, materiaalimallin ei tarvitse olla niin tarkka, koska jännitykset ovat toissijaisia. Kumeista saadut reometritulokset vaihtelivat hieman tuotantoerästä riippuen, jonka vuoksi käytettiin useamman tuotantoerän tulosten keskiarvoa virheiden minimoimiseksi.

6.2 Verifiointiin liittyvät virheet

Kaikki verifiointin olleet rengasaihiot kuuluivat samaan kokoluokkaan kuin FEM-malli. Tällä minimoitiin rengastyypeistä aiheutuneet virheet. Toki tuotantoeristä johtuen

rengasaihioissa saattoi olla pieniä eroavaisuuksia, mutta kuitenkin kaikki olivat toleranssirajojen sisällä ja virhe oli erittäin minimaallinen. Myös käytettävä paistopuristin saattoi tehdä hyvin pieniä virheitä.

Fujifilm painekalvon tarkkuus on $\pm 10\%$. Sitä käytettiin hieman suositus lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa ja kalvo pääsi hieman rypistymään jostain kohdin. Lisäksi kalvo kiinnitettiin rengasaihioon ohuella kumilevyllä, joka hieman vaimentaa kohdistuvaa painetta. Tästä johtuen tuloksiin aiheutui pieniä virheitä, mutta toisaalta tarkoitus oli nähdä miten paine jakautuu rengasaihion sivupinnalle, eikä numeerisista arvoista oltu niin kiinnostuneita.

7 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tutkia miten kokoluokan 225/40 R18 rengasaihion muotoon päädytään ja miten se sopii muottiin. Abaqus-elementtimenetelmäohjelmalla mallinettiin 2D-FEM-malleja, joiden avulla pystyttäisiin tutkimaan mitä rengasaihioille tapahtuu paiston aikana. Tutkittavaksi aihioiksi valittiin 225/40 R18 kokoluokan rengas, jonka käyttäytymistä verrattiin muihin rengasaihioihin. Vertailukohtina olevia rengasaihioita mallinnettiin kuusi kappaletta.

2D-FEM-mallin geometriana käytettiin aksisymmetristä renkaan poikkileikkauksen puolikasta, jonka ansiosta saatiin tehtyä nopeasti ratkaistava, kevyt laskentamalli. 2D-malli tehtiin komponenttien rakennekuvien mittojen perusteella. Venymien, paistotyynyn ja renkaan koko poikkileikkauksen huomioiminen ei vaikuttanut merkittävästi analyysin tuloksiin. Tällöin 2D-malli voitiin toteuttaa yksinkertaisemmin, jolloin saatiin mallinnettua useampi rengasaihio nopeammin ja riittävällä tarkkuudella.

2D-mallin luomisen jälkeen malli verkotettiin, sille määritettiin materiaaliarvot, reunaehdot ja varsinaisen analyysin vaiheet. Verkotusta muokattiin manuaalisesti parempien laskentatuloksien saavuttamiseksi. Materiaalimallina käytettiin Neo-Hookea ja sen arvot saatiin hyödyntämällä Nokian Renkaiden laboratoriotuloksia. Paistotapahtuman paineet otettiin paistoreseptistä.

Tärkeänä osana työtä oli FEM-mallin verifiointi, jotta sitä voitiin pitää luotettavana. Todennus tehtiin tutkittavalle 225/40 R18 kokoluokan FEM-mallille. Haluttiin selvittää mistä teräsvöiden suuri kapeneminen johtuu, miten muotti alkaa ottamaan rengasaihioon kiinni paistossa ja millainen on painejakauma rengasaihion sivupinnalla. Tuloksien perusteella teräsvyöt kapenevat enemmän sileässä renkaassa kuin kuviollisessa renkaassa. FEM-malliin ei tehty pintakuviointia, jolloin se käyttäytyi vastaavasti kuin sileä rengas. Analyysissä rengasaihion ja muotin yhdistyminen vastasivat oikeaa paistotapahtumaa. Muotti kiinnittyi ensin rengasaihion jalka- sekä olkapääalueelle ja sitten pinta alkoi painautumaan muottia vasten. Painejakauma renkaan sivupinnalla vastasi painekavoilla mitattuja tuloksia ja suurin paine kohdistui jalka-alueelle. Verifiointin perusteella saatiin siis mallinnettua riittävän luotettava rengasaihion 2D-FEM-malli.

FEM-malleja tutkiessa selvitettiin tapahtuuko analyysin aikana mitään erikoista, millainen painejakauma rengasaihion sivupinnalle muodostuu, minkälaisia kutistumia esiintyy ja minne muodostuu renkaan kapein kohta. Analyyseissä tutkittava rengasaihio oli ainut jolla sivupinta irtosi kokonaan muotista rengasaihion pinnan kiinnittyessä muottiin. 225/40 R18:ssa muottien liitoskohdan läheisyyteen syntyi painetta, kun muissa rengasaihioissa paine keskittyi vannesuojan läheisyyteen. Todettiin renkaan profiilin ja pinnan leveyden kasvaessa kutistuman suurenevan ja ensimmäisen runkokoordin mittaa kiristäessä kutistumien pienenevän. Kapeimman kohdan sijainnilla ei ollut merkittävän suurta eroa.

Työssä oli pieniä laskennallisia ja kokeellisia virheitä. Laskennallisia virheitä syntyi lähinnä geometrian ja FEM-mallin yksinkertaistuksesta, muun muassa verkotuksesta ja materiaalmallista. Kokeellisia virheitä syntyi taas mittausvälineistä, esimerkiksi painekalvoista. Näistä aiheutuneet virheet olivat kuitenkin pieniä, eivätkä vaikuttaneet juurikaan tuloksiin.

Tuloksien perusteella kokoluokan 225/40 R18 rengasaihioille suurin kehityskohde on siis painejakauman muuttaminen. Kokeiltiin siirtää FEM-mallin muotin sivupinnan jalkaosaa sisään ja ulospäin. Huomattiin muotin sivupinnan siirtämisen ulospäin muodostavan vastaavan painejakauman kuin vertailukohtana olevilla renkailla. Tämä voisi siis olla yksi ratkaisu painejakauman muuttamiseen. Toki on tärkeää muistaa, että tämäkin FEM-mallinnus pitäisi verifioida sen luotettavuuden takaamiseksi. Tässä työssä muottiin ei tehty muutoksia, sen valmistusajan ja -hinnan takia. Muotin valmistuksessa kestää useita viikkoja, ja yksi muotti maksaa keskitasoa paremman auton verran (Nokian renkaat Oyj). Jatkossa painejakaumaa olisi järkevämpää tutkia paineantureilla kuin painekalvoilla. Paineantureilla saataisiin jopa millibaarin tarkkuudella mitatut paineet. Tällöin voitaisiin tutkia tarkemmin lukuarvoja ja saada vielä tarkempi käsitys painejakaumasta, sekä kumin virtaamisesta.

Kokonaisuudessaan työssä opittiin miten rengasaihio tehdään ja kuinka se pystytään mallintamaan. Lisäksi FEM-malli todettiin olevan realistinen erilaisten verifiointien avulla. Opittiin miten rengasaihio lähtee muokkautumaan muotissa, kuinka vahvikkeet ja teräsvyöt kutistuvat analyysin aikana, minne kapein kohta muodostuu ja miten paine jakautuu renkaiden sivupinnoissa. Lisäksi FEM-mallien vertailussa löydettiin eroavaisuuksia ja tätä kautta kehityskohteita, joiden avulla tuottavuutta voitaisiin parantaa. FEM-malleista

tehtiin hyvä dokumentointi, ja niitä on jatkossa helppo muokata tai tehdä samalla mallinustekniikalla uusia vertailtavia rengasaihioita.

LÄHTEET

Abaqus Analysis User's Guide, version 6.14

Abaqus Theory Guide, version 6.14

Anton Paar. 2016. Kuvakaappaus reometristä. RheolabQC. Katsottu 22.08.2016.

<http://www.anton-paar.com/us-en/products/details/quality-control-rheometer-rheolabqc/>

Chandrupatla T. R. & Belegundu A. D. 2002. Introduction to Finite Elements in Engineering. Third edition, New Jersey: Prentice Hall.

China Good Quality Disc Oil Separator. 2014–2016. Press machine for tire. Kuvakaappaus paistopuristimesta.. Katsottu 31.08.2016.

<http://www.tyrecuringpress.com/sale-2317321-electrical-100t-platen-vulcanizing-press-machine-truck-tyre-vulcanization.html>

Dassault Systèmes. 2016. Abaqus unified FEA.

Luettu 03.07.2016. <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

Gent, A. N. & Walter J. D. (ed.) 2005. The Pneumatic Tire. First edition, Washington D. C.: NHTSA.

Han, I.-S., Chung, C.-B., Kim, S. -J., Chung, H.-C., Cho, C.-T. & Oh, S.-C. 1996. Dynamic Simulation of Tire Curing Process. Tire Science and Technology, TSTCA Vol. 24 (1). 50–76.

Hankook. n.d. Tire Structure. Luettu 09.07.2016.

<https://www.hankooktyre.com.au/Tech/Structure.aspx?page-Num=3&subNum=4&ChildNum=4>

Herbert. n.d. Tire molds. Luettu 05.10.2016.

<http://www.herbert.eu/1/products/tire-molds/>

Hunkins J. 2015. Coker Can Help You Find Just The Right Tires & Wheels At Their SoCal Showroom. Kuvakaappaus rengasmuotista. Julkaistu 02.06.2015. Katsottu 16.07.2016.

<http://www.hotrod.com/articles/coker-can-help-you-find-just-the-right-tires-and-wheels-at-their-socal-showroom/>

Fujifilm. n.d.Fuji Prescale pressure measuring film. Instruction sheet. Luettu 21.09.2016.

<http://www.spare.it/prescale-letteratura/Prescale-LW-manual.pdf>

Lähtenmäki, M. 2008–2009. Lujuusopin jatkokurssi, luentokalvot. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu. Luettu 20.07.2016.

Lähtenmäki, M. 2012–2013a. Elementtimenetelmän perusteet, luentokalvot. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu. Luettu 02.07.2016.

Lähteenmäki, M. 2012–2013b. Lujuusoppi 2, luentokalvot. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu. Luettu 20.07.2016.

Laurila, T., 2007. Kumitekniikka. Lyhyt johdatus kumitekniikan perusteisiin. 1. painos. Kerava: Edita Prima.

Mark, J. E., Erman, B. & Eirich, F. R. (ed.) 2005. The Science and Technology of Rubber. Third edition, USA: Elsevier Academic Press.

Ochoa O.O. & Reddy J.N. 1992. Finite Element Analysis of Composite Laminates. First edition, Netherlands: Academic Publishers.

Palo-oja R. & Willberg L. 1998. Kumi. Kumin ja Suomen kumiteollisuuden historia. 1. painos. Tampere: Tampereen museot ja kumiteollisuus ry.

Prekop, Š., Várkonyi, L., Janyška, P., Klabník, M., Šuriová, V., Chromek, M., Ondurška, M., Korček, M., Novosad, L., Toman, J., Fajerík, R., Zlocha, J., Galbavý, P., Škulec, M., Brescher, R., Červen, L., Sojčák, J., Vlasko, P., Neiplová, L., Šuri, P., Kvocera, I., Burdej, S., Drábik, J., Pečeň, J. & Chupeková, M. 2006. Rubber Technology. Composite author. First edition, Púchov: GC TECH Peter Gerši.

Rongda. n.d. Kuvakaappaus rengasmuotista. Tire mold. Katsottu 16.07.2016. <http://rdmuju.com/en/products-look.aspx?id=8>

Shendeld, V., Skiden, G. & Bodner, A. 2002. From tire building to curing using FEM. Tire Technology International 2002 9 (1). 26–29.

Surendranath, H. & Kuessner, M. 2003. Assessment using finite element analysis. Tire Technology International 2003 10 (1). 16–18.

VMI MXX tire building. Kuvakaappaus renkaan kokoonpanolinjastosta. Youtube 2014. Katsottu 24.08.2016. <https://www.youtube.com/watch?v=SyhFggi92hE>.

LITTEET

Liite 1. Kutistumat analyyseissa

